www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

11e JAARGANG No. 7, blz. 197-224 JULI 1949

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: LABORATORIUM VOOR WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

EEN RÖNTGENAPPARAAT VOOR THERAPIE

door B. COMBEE en J. FRANSEN.

621.386.1:615.849

De behandeling met röntgenstralen is voorlopig nog een der belangrijkste hulpmiddelen die ons bij de bestrijding van kwaadaardige gezwellen ten dienste staan. Er is een tendentie om hierbij ook van uiterst harde stralen, verkregen met spanningen van millioenen volts, gebruik te maken, ten einde tot een doelmatiger dosisverdeling in het lichaam te komen. Voor instituten die over ruime middelen beschikken, worden steeds nieuwe en grotere installaties voor dit doel ontwikkeld. Maar ook op het gebied der min of meer klassieke apparaten, die met spanningen tot enige honderden kilovolts werken, staat de ontwikkeling niet stil: door moderne constructiemethoden toe te passen, tracht men deze apparaten een vorm te geven die het den medicus steeds beter mogelijk maakt, bestralingen snel, doelmatig en met exacte dosering uit te voeren. Het „Compactix" therapie-apparaat van Philips is een voorbeeld van zulk een moderne uitvoering.

Inleiding

Aan röntgenapparaten voor medische bestraling wordt in het algemeen de eis gesteld dat de stralenbundel een grote mate van beweegbaarheid bezit, opdat men de stralen van alle kanten op de patient kan richten. Bij de klassieke opstellingen werd te dien einde de röntgenbuis met diverse vrijheidsgraden van beweging aan een statief opgehangen, en de vereiste hoge voedingsspanning werd via flexibele kabels van een vast opgestelde hoogspanningsgenerator naar de buis gevoerd. Sinds ongeveer tien jaren heeft men daarnaast ook therapie-apparaten volgens een ander constructieprincipe ontwikkeld: de hoogspanningsgenerator wordt hierbij met de röntgenbuis tot een eenheid samengebouwd, die, aan een statief opgehangen, eveneens in meerdere of mindere mate beweegbaar is, terwijl de uit constructief oogpunt lastige kabelverbinding is komen te vervallen. In dit artikel zal het door Philips op deze grondslag gebouwde „Compactix" therapie-apparaat worden beschreven, dat bestemd is voor een buisspanning tot 200 kV_{max}, bij een gemiddelde buisstroom tot 10 mA. *Fig. 1* geeft een overzicht van de installatie.

Voor uiterst hoge spanningen, bijv. van 1 millioen volt, is het samenbouwen van buis en generator de enige practisch mogelijke oplossing, als men uitgaat van het tegenwoordig algemeen gehuldigde beginsel van volledige beveiliging van de gebruiker tegen de hoge spanning en als men de beweegbaarheid van de stralenbundel niet wil opofferen. Anderzijds is het principe van het samenbouwen van buis en generator het eerst toegepast juist bij heel kleine röntgenapparaten, met betrekkelijk lage spanning en gering vermogen, die voor sommige doeleinden in de medische diagnostiek zijn geconstrueerd [1]); de hoogspanningskabels zouden bij zulk een klein toestel een onevenredig groot en zwaar onderdeel van het geheel hebben gevormd. Voor de apparaten met spanningen tot 200 of 300 kV, die voor het behandelen van diep liggende tumoren het meest worden gebruikt, hebben echter beide bouwwijzen, die mèt en die zónder kabels, hun merites.

Bij het construeren van het „Compactix"-apparaat werden nieuwe wegen gezocht op het gebied van de isolatie voor hoge spanningen, de koeling, en de bescherming van de gebruiker tegen ongewenste röntgenstralen. Dank zij een doelmatige oplossing voor deze problemen was het mogelijk de resulterende eenheid van buis en generator betrekkelijk klein en licht te houden en zodoende tot een gemakkelijk instelbaar apparaat te geraken,

[1]) Zulk een apparaat werd door A. Bouwers reeds in 1933 gedemonstreerd. Zie: A. Bouwers, Modern X-ray development, Brit. J. Radiology **7**, 21, 1934; verder ook Philips techn. T. **6**, 225, 1941, en **10**, 69, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

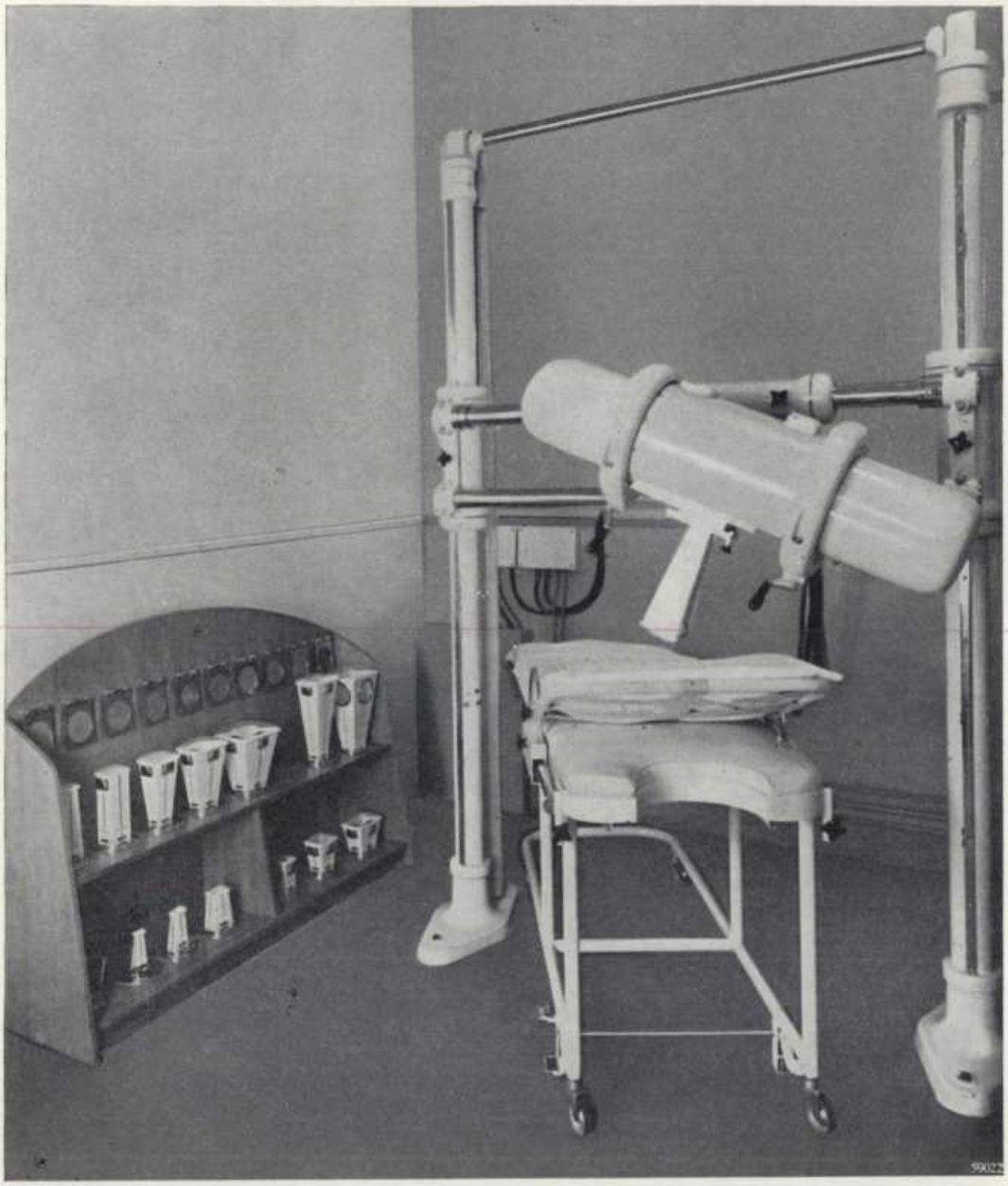


Fig. 1. Het „Compactix"-apparaat voor röntgentherapie, met statief en verrijdbare behandelingstafel. In de kast links de bijbehorende bestralingstubi en filters. Het apparaat wordt bediend van een lessenaar af, opgesteld in een aangrenzend vertrek, van waar de medicus of röntgenzuster via een venster van loodglas de patient tijdens de bestraling kan observeren.

dat den medicus de mogelijkheid biedt elke behandeling onder de gunstigste omstandigheden te doen plaats hebben.

Behalve aan de genoemde constructieproblemen, die in de beschrijving van de röntgenbuis en de generator ter sprake komen, zal in het onderstaande ook enige aandacht worden besteed aan diverse nieuwigheden die in de schakeling van het apparaat en in de bedieningslessenaar zijn toegepast. Enige opmerkingen over de bij de bestralingen te gebruiken hulpmiddelen, als filters en tubi, en over de verkrijgbare dosisverdeling besluiten het artikel.

De röntgenbuis

In fig. 2 is een foto van de röntgenbuis weergegeven; *fig. 3* is een enigszins vereenvoudigde doorsneetekening, waarin ook de belangrijkste afmetingen zijn vermeld. Men ziet in de tekening de wolfraam pastille P, die in de schuine voorkant van het koperen anodeblok is aangebracht en waarop de electronen, uitgezonden door de gloeidraad F, worden gefocusseerd. In de betrekkelijk sterke afschuining van de anode (anodehoek $\alpha = 32°$, tegenover 15 à 20° bij de meeste diagnostiekbuizen) komt al dadelijk het specifieke karakter van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

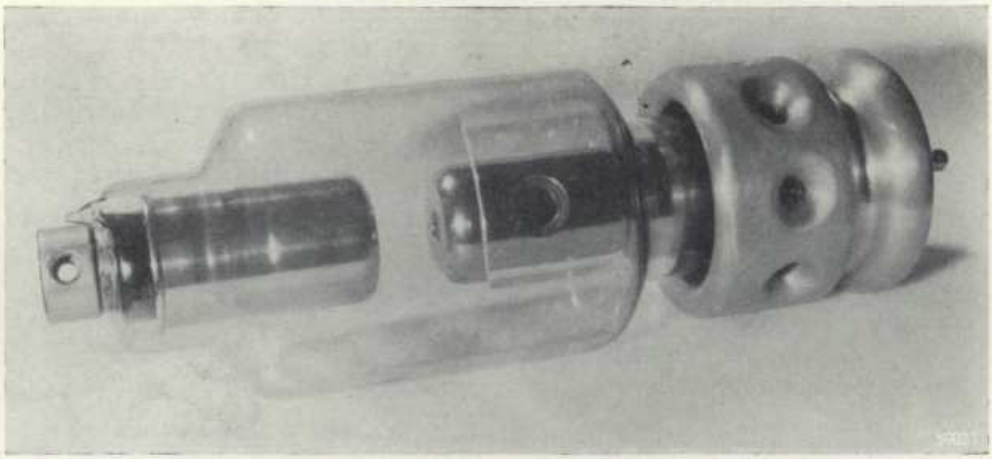


Fig. 2. Röntgenbuis van het „Compactix"-apparaat. De buis is van hard glas en wordt in olie geplaatst. De radiator op het rechtereinde draagt de warmte van de anode aan de olie over. De gaten in de radiator laten de olie vrij doorstromen, zodat geen dode hoeken rondom de insmelting van de anode in de buis ontstaan.

een therapiebuis tot uiting: van de uit P naar alle zijden geëmitteerde röntgenstraling kan daardoor een kegel (R) met een grote openingshoek nuttig worden gebruikt, zodat men grote velden op betrekkelijk kleine afstand kan bestralen.

De buis wordt onder olie in een geaard metalen omhulsel geplaatst. Aan de isolatie door olie is het te danken dat voor de hoge spanning van 200 kV_{max} met zulk een geringe lengte van de buis (kleine afstand tussen de beide polen) kan worden volstaan. De olie dient tevens voor de koeling [2]). Op het einde van de anode dat buiten de buis steekt, is een radiator met een groot oppervlak aangebracht. Hier omheen bevinden zich op 4,5 cm afstand, binnen het omhulsel, koelwaterspiralen, die geaard zijn en derhalve op de waterleiding kunnen worden aangesloten. De op het focus ontwikkelde warmte wordt dus, nadat zij door het anodelichaam naar de radiator is geleid, door deze overgedragen aan de omgevende olie en vervolgens door convectie in de vrij rondstromende olie afgevoerd naar de met water gekoelde pijpen. Met deze eenvoudige koelmethode kan een vermogen van 1,4 kW zonder moeilijkheden continu worden verwerkt.

Laat men de olie niet vrij rondstromen doch past men een geforceerde koeling toe, waarbij de olie in de holle anode gespoten wordt, dan kan men grotere vermogens ontwikkelen. De noodzakelijkheid van een oliepomp met het daaraan verbonden lawaai is echter een nadeel, dat we in ons geval hebben willen vermijden.

[2]) Dit constructieprincipe, toegepast op diagnostiekbuizen en ook op een therapiebuis die in grote trekken overeenkwam met de thans beschrevene, is reeds uitvoerig in dit tijdschrift besproken: J. H. van der Tuuk, Hardglazen röntgenbuizen in olie, Philips techn. T. **6**, 314-320, 1941.

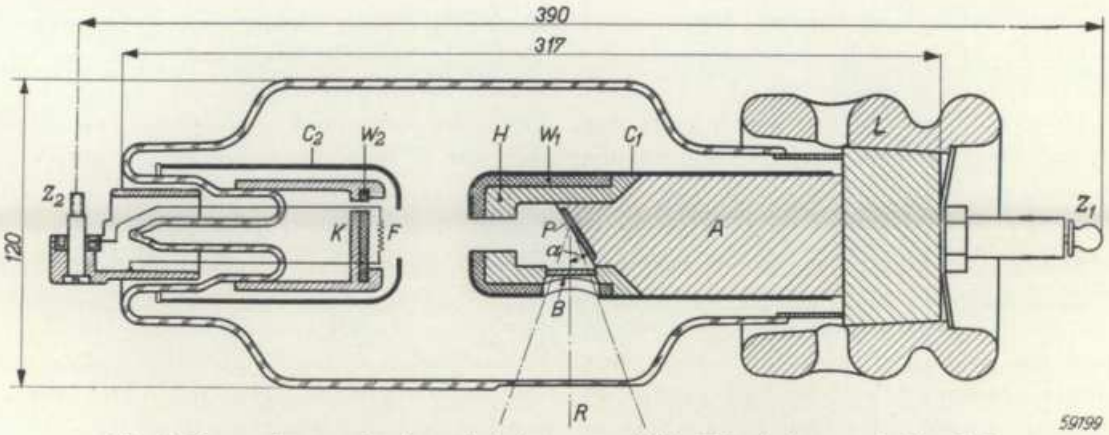


Fig. 3. Doorsnede van de röntgenbuis (vereenvoudigd). K kathode met gloeidraad F, A anode met wolfraam pastille P, H anodehoed voor het opvangen van secundaire electronen, B beryllium venster dat de nuttige röntgenstralenbundel R doorlaat, W_1 wolfraam dop en W_2 wolfraam plaat voor de absorptie van de ongewenste röntgenstralen, C_1 en C_2 gepolijste chroomijzeren kappen, L radiator, Z_1 en Z_2 polen voor het aansluiten op hoogspanning tot 200 kV_{max}.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De beperkende factor voor het vermogen is in ons geval de temperatuur van de olie op het radiatoroppervlak: zou deze te hoog worden, dan gaan de isolatie-eigenschappen van de olie achteruit. De temperatuur van de anode ter plaatse van de insmelting, die bij andere constructies soms de grens aan het vermogen stelt, blijft hier ruimschoots beneden de maximaal toelaatbare waarde van ca 200 °C. Elders, met name in het focus, is de anode natuurlijk heter, ondanks de goede warmtegeleiding van het koper. De specifieke focusbelasting is echter betrekkelijk klein (30 W/mm²), zodat ook de focustemperatuur nog ruimschoots beneden de hiervoor toelaatbare waarde (bijv. 500 °C) blijft en men dus met het probleem van de primaire warmte-afvoer van het focus, dat bij zwaar belaste diagnostiekbuizen zo sterk op de voorgrond treedt [3]), hier niet te maken heeft. Wel is de specifieke focusbelasting bij deze buis groter gekozen dan gewoonlijk bij therapiebuizen wordt gedaan. Het focus is nl. betrekkelijk klein gemaakt (5×10 mm², geprojecteerde grootte 5×5 mm²), ten einde het apparaat eveneens bruikbaar te maken voor materiaalonderzoek, waarbij de scherpte der bij doorstraling verkregen schaduwbeelden afhangt van de focusgrootte.

Bij therapie doet de focusgrootte er in eerste instantie niet toe, doch een beperking van de focusafmetingen is ook hier gunstig omdat men de bestraalde volumina dan scherper kan afgrenzen (geringe halfschaduwbreedte der diafragmaranden).

Op de anode is een „anodehoed" gemonteerd, die de secundaire electronen opvangt, welke van het focus op de anode uitgaan. Aldus wordt de glazen buiswand tegen een electronenbombardement beschermd en kunnen er geen gevaarlijke, tot doorslag leidende wandladingen ontstaan. De hoed bestaat in eerste instantie uit een koperen dop, in goed warmtecontact met de anode, zodat de energie der opgevangen secundaire electronen vlot naar het anodeblok wordt afgevoerd. Over deze koperen dop is een tweede dop, van wolfraam, geschoven, die tot taak heeft de röntgenstralen die in ongewenste richtingen gaan, tegen te houden. Over de wolfraam dop en het gehele anodeblok is nog een gepolijste chroomijzeren kap geplaatst. Hierdoor vermijdt men een „koude emissie" van electronen uit de buitenkant van de anode, in de fase waarin deze op negatieve spanning staat (de buis wordt met wisselspanning gevoed). Bovendien slaan op de binnenwand van de chroomijzeren kap, die betrekkelijk koud blijft, eventuele verontreinigingen neer die tijdens het pompproces of tijdens het gebruik uit de anodeonderdelen vrij kunnen komen en die men liefst niet op de buiswand wil laten belanden.

Over de absorptie der ongewenste röntgenstraling dient hier nog iets meer te worden gezegd. Bij de ontwikkeling der Philips röntgenapparaten is van ouds veel aandacht aan dit punt besteed. Zo moge worden herinnerd aan de ontwikkeling der „Metalix"-buizen in 1923 [4]), waarin voor het eerst een constructie met volledige bescherming van de gebruiker tegen röntgenstralen buiten de nuttige kegel werd verwezenlijkt (enkele jaren later werd hiermee ook een volledige bescherming tegen het aanraken van onder hoogspanning staande delen gecombineerd). Ook bij het ontwerpen van het „Compactix"-apparaat stond deze gedachte voorop. Om de 200 kV-röntgenstraling zo ver te verzwakken dat in de ruimte waar het personeel zich ophoudt, de tolerantiedosis niet wordt overschreden (volgens de voorschriften in verschillende landen ongeveer 0,05-0,1 röntgen per dag), is rondom de stralenbron een loodscherm ter dikte van 4 à 5 mm nodig. Buiten op het omhulsel van het apparaat aangebracht, zou zulk een dikke laag lood door haar groot gewicht niet bepaald bevorderlijk zijn voor de nagestreefde gemakkelijke hanteerbaarheid van het geheel. Door nu de absorberende laag in de buis zelf aan te brengen, op geringe afstand rondom het focus, wordt het gewicht er van tot enkele honderden grammen gereduceerd.

Natuurlijk kan men in de buis geen lood gebruiken, daar dit bij de temperatuur waarop de buis wordt ontgast, zou smelten. De absorptie van de straling wordt daarom in hoofdzaak bewerkstelligd met wolfraam. Het atoomnummer hiervan (74) is slechts weinig kleiner dan dat van lood (82), zodat de vereiste laag wolfraam ongeveer hetzelfde gewicht heeft als een aequivalente laag lood. Het koper van de anodehoed en het chroomijzer van de buitenste kap dragen slechts weinig tot de absorptie bij; zij zijn aequivalent met ca 0,4 mm lood, terwijl de totale loodaequivalentie van de drie lagen 4 mm lood bedraagt. Geheel zonder absorberende laag in het omhulsel van het apparaat kan men het niet stellen, aangezien in de olie en op de binnenwand van het omhulsel secundaire röntgenstralen ontstaan, die eveneens onschadelijk moeten worden gemaakt; door een laag lood van 1 mm dikte wordt deze secundaire straling voldoende

[3]) Zie bijv.: J. H. van der Tuuk, Philips techn. T. **3**, 296, 1938 en **8**, 33, 1946.

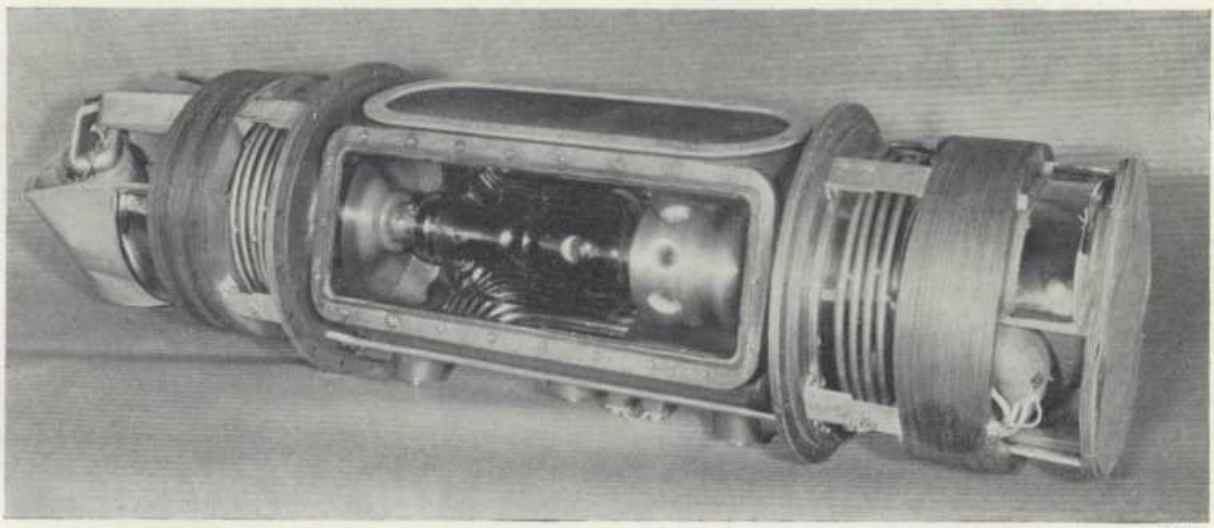
[4]) Zie bijv.: A. Bouwers, Een nieuwe röntgenbuis, Physica **4**, 173, 1924.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verzwakt. De totale verzwakking van de ongewenste directe röntgenstralen beantwoordt dan aan de absorptie van 5 mm lood.

De anodehoed heeft een opening voor het binnenlaten van de primaire electronen, en een opening voor het laten uittreden van de nuttige röntgenstralenkegel. De eerste opening laat behalve een klein deel van de secundaire electronen, ook ongewenste röntgenstralen ontsnappen; deze laatste worden geabsorbeerd door een plaat wolfraam die hiertoe in de kathode is aangebracht. De secundaire electronen die door de tweede opening, mèt de nuttige röntgenstralen, zouden uittreden, houdt men tegen door in deze opening een beryllium plaatje aan te brengen. Dank zij het zeer lage atoomnummer (4) verzwakt het beryllium de nuttige röntgenstralen slechts zeer weinig. Om ook op hun verdere weg naar buiten deze stralen zo weinig mogelijk te verzwakken, is de glazen buiswand ter plaatse van de bundel door afslijpen dunner gemaakt, zoals men duidelijk in fig. 2 en 3 kan zien. Ook is het grootste gedeelte van de omgevende laag olie hier ter plaatse door een in het omhulsel gezette „Philite" dop verdrongen. Het „eigen filter" van het apparaat (zie het laatste hoofdstuk) is zodoende teruggebracht tot een aequivalent van ca 2 mm aluminium bij 80 kV_{max}.



59026

Fig. 4. De röntgenbuis is met de hoogspanningstransformatoren (rechts en links) en de gloeistroomtransformator (geheel links) tot een eenheid samengebouwd, die in een cylindrische tank wordt gemonteerd. Het buiscompartiment heeft een afneembaar deksel. In alle drie compartimenten ziet men de koelwaterspiralen.

De hoogspanningsgenerator

De wens om de hoogspanningsgenerator zo klein en zo licht mogelijk te houden, heeft geleid tot de keuze van wisselspanning als spanningsvorm voor het bedrijven van de röntgenbuis. De generator bestaat dan in hoofdzaak slechts uit een hoogspanningstransformator en een gloeistroomtransformator. Als ingangsspanning kan dienen elke netspanning tussen 200 en 250 volt, met een frequentie van 40, 50 of 60 per/sec.

Om de moeilijkheden van de hoogspanningsisolatie zoveel mogelijk te beperken, krijgt de röntgenbuis spanning welke symmetrisch is ten opzichte van aarde. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van twee afzonderlijke hoogspanningstransformatoren, die, in tegenfase werkend, ieder één pool van de buis op de halve hoogspanning (100 kV_{max}) brengen. Dank zij deze splitsing kon het gewicht van de generator worden verdeeld: aan elk einde van de cylindervormige tank, waarin het apparaat is ondergebracht, wordt één der beide transformatoren geplaatst; zie *fig. 4*. Het focus van de in het midden geplaatste röntgenbuis bevindt zich daardoor ongeveer in het zwaartepunt van het gehele apparaat, hetgeen voor het instellen zeer practisch is (zie hieronder).

De röntgenbuis werkt zelf als gelijkrichter, dwz. zij laat alleen stroom door in die helft van de periode der hoogspanning waarin de anode positief en de gloeidraad negatief is. Ten gevolge van de spanningsverliezen, die de stroom in de transformatorwikkelingen enz. veroorzaakt, is de buisspanning in deze periodehelft tot 10% lager dan die in de andere, stroomloze periodehelft. Ten einde nu de isolatieeisen niet nodeloos door de inactieve periode te verzwaren, is een zg. keerspanningsonderdrukking toegepast. Hiertoe is in serie met elk der beide primaire wikkelingen een combinatie

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van een seleniumventiel en een weerstand geschakeld; zie het schema *fig. 5*. Gedurende de werkfase vloeit de primaire stroom door de seleniumventielen en ondervindt daarin nagenoeg geen weerstand. Gedurende de andere periodehelft echter moet de primaire stroom door de weerstanden vloeien zodat het daarin optredende spanningsverlies de opgewekte hoogspanning verlaagt.

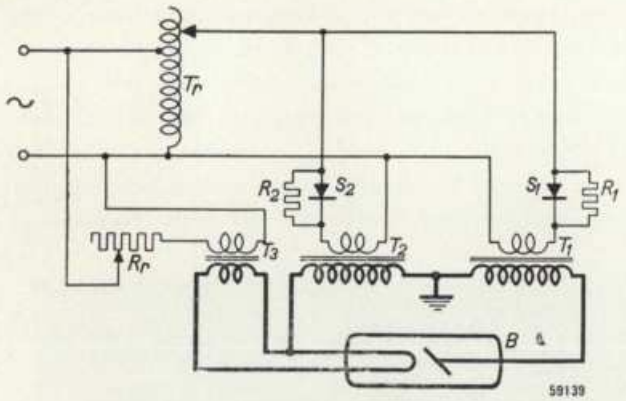


Fig. 5. Principeschema van de schakeling van de hoogspanningsgenerator. In de primaire ketens der beide hoogspanningstransformatoren T_1, T_2 is een „keerspanningsonderdrukking" toegepast (seleniumventiel en weerstand S_1, R_1 resp. S_2, R_2). B röntgenbuis, T_3 gloeistroomtransformator. T_r regeltransformator en R_r regelbare serieweerstand voor de later te bespreken instelling van buisspanning resp. buisstroom.

Tevens vervullen deze weerstanden een belangrijke functie bij het optreden van een eventuele kortstondige doorslag in de röntgenbuis. De altijd aanwezige aardcapaciteiten van de secundaire wikkelingen vormen met de spreidingszelfinductie van de hoogspanningstransformatoren trillingskringen, waarop bij een spanningsstoot (doorslag in de buis) gevaarlijke overspanningen zouden kunnen ontstaan. Door de dempende werking van de weerstanden in de primaire ketens worden deze overspanningen sterk beperkt.

De transformatoren konden zeer compact worden geconstrueerd dank zij het gebruik als isolatiemateriaal van papier met olie geïmpregneerd, een combinatie welke bij condensatoren en kabels haar betrouwbaarheid en grote belastbaarheid bewezen heeft. In *fig. 6* is een der beide hoogspanningstransformatoren afzonderlijk afgebeeld. De cirkelronde vorm van het juk is gekozen met het oog op het onderbrengen in een cylindrische tank. De primaire wikkeling is in twee delen gesplitst, die aan weerskanten van de grote secundaire wikkeling op de kern zijn geschoven; hierdoor wordt de ruimte goed gebruikt en wordt tevens een gunstig verloop van de electrische krachtlijnen tussen de windingen van de secundaire spoel en de omgeving verkregen. De papierisolatie is zodanig gevormd dat zoveel mogelijk de electrische krachtlijnen loodrecht staan op het papieroppervlak. Op het einde van de secundaire spoel, waar de pool van de röntgenbuis wordt aangesloten, wordt een metalen scherm in de papierisolatie verwerkt (zg. potentiaalscherm), dat de maximaal optredende veldsterkte tussen deze hoogspanningspool en het geaarde juk klein helpt houden en dat tevens de capaciteit der buitenste windingen van de secundaire spoel ten opzichte van aarde verkleint. Dit laatste is van belang om de bij eventuele doorslagen in de buis optredende overspanningen gelijkmatig over de secundaire wikkeling te verdelen.

Uit fig. 4 en de vereenvoudigde doorsneetekening *fig. 7* van de gehele tank blijkt op welke wijze de transformatoren en de röntgenbuis hierin zijn ondergebracht. Het compartiment voor de buis, gevormd door een centraal gietstuk van licht metaal, is geheel gescheiden van de beide aangrenzende compartimenten voor de transformatoren. Dank zij de scheiding van de compartimenten behoeft de olie van de transformatoren niet mee te doen aan de warmte-afvoer van de röntgenbuis en blijft dus kouder, en de röntgenbuis kan, als zij aan het einde van haar levensduur is gekomen, worden verwisseld zonder dat de olie van de transformatoren aan de lucht wordt blootgesteld.

Het probleem van de warmte-uitzetting van de olie is in dit geval als volgt opgelost. De olie van de buisruimte kan expanderen doordat in een van de wanden een tegen olie bestand rubber membraan is aangebracht (bovenaan in fig. 4 zichtbaar).

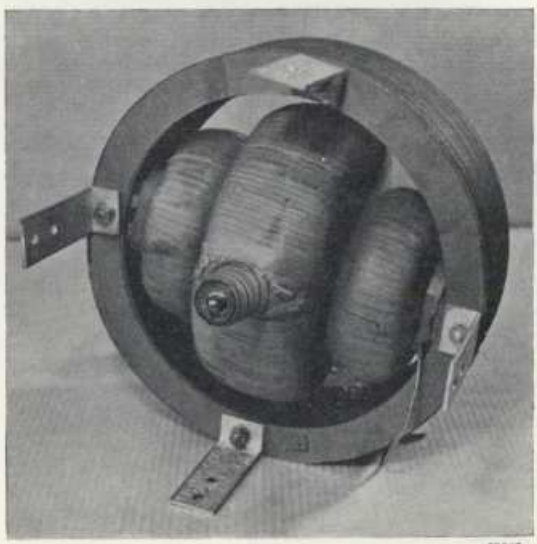


Fig. 6. Een der beide hoogspanningstransformatoren, met cirkelrond juk, isolatie door lagen papier geïmpregneerd met olie, en met een primaire wikkeling bestaande uit twee delen, geplaatst aan weerskanten van de secundaire wikkeling. De hoogspanningspool van deze laatste, die aan een der polen van de röntgenbuis wordt verbonden, steekt naar voren uit.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De beide transformatorcompartimenten staan door een kanaal dat langs het buiscompartiment loopt, met elkaar in verbinding en hebben daardoor slechts één gemeenschappelijke expansie-inrichting van node. Hierin is voorzien door een metalen veerdoos, aangebracht in het compartiment voor de transformator aan de anodezijde. De corresponderende ruimte in het tegenoverliggende compartiment biedt plaats aan de gloeistroomtransformator, zodat het apparaat, bij vrijwel compacte vulling met onderdelen, symmetrisch is gebleven.

begrenzing van de slag in deze richting is noodzakelijk om een voldoende koeling van de anode door convectie in de olie te behouden (de buis moet niet loodrecht komen te staan met de anoderadiator boven). In de beide ringen kan de tank door middel van een tweede kruk (in fig. 1 rechts) om zijn eigen lengte-as worden gedraaid over een hoek van 240°. Bij deze beide bewegingen blijft het zwaartepunt van het geheel en derhalve ook het focus van de röntgenbuis, dat zich in dit zwaartepunt bevindt, op zijn plaats.

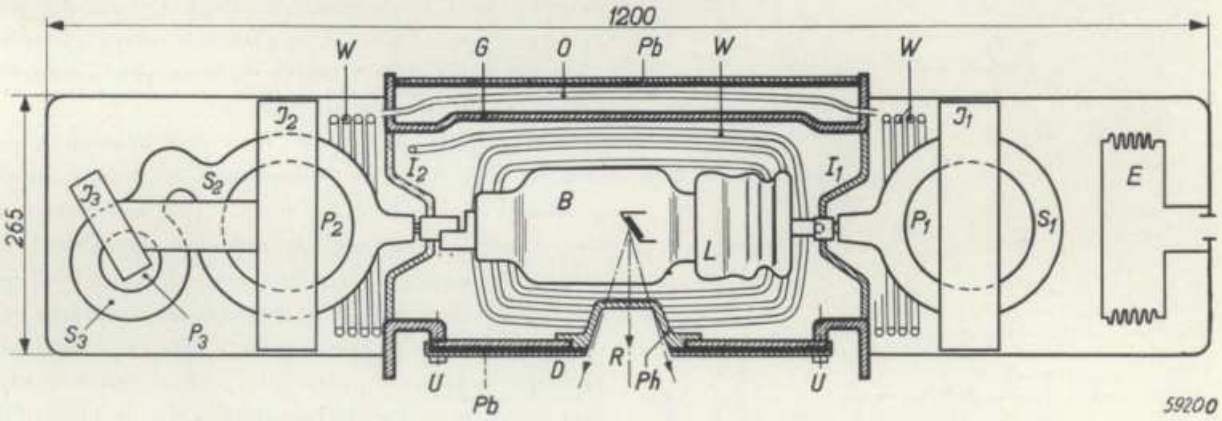


Fig. 7. Doorsnede van de tank van het „Compactix"-apparaat (vereenvoudigd). *G* centraal gietstuk, *B* röntgenbuis, I_1,I_2 schalen van „Philite" met doorvoeren voor de hoogspanning. J_1, P_1, S_1 juk, primaire en secundaire wikkeling van de anodetransformator, J_2, P_2, S_2 idem van de kathodetransformator, J_3, P_3, S_3 idem van de gloeistroomtransformator, *L* radiator, *W* koelwaterspiralen in de drie compartimenten, *O* verbindingskanaal tussen de twee transformatorcompartimenten, *E* veerdoos voor expansie van de olie, *D* afneembaar deksel, bevestigd met schroeven *U*, *Ph* „Philite" dop ter plaatse van de nuttige röntgenstralenkegel *R*, *Pb* loodmantel van 1 mm dikte in het omhulsel.

Aangezien voor de koeling van de röntgenbuis toch een aansluiting op de waterleiding nodig is, konden zonder extra complicatie ook enige koelwaterspiralen in de transformatorcompartimenten worden gelegd, hetgeen nuttig was om de transformatoren zo klein mogelijk te kunnen construeren. De totale verliezen hierin bedragen ongeveer 200 watt.

Ophanging van het apparaat

In fig. 1 is de cylindrische tank te zien, opgehangen aan het statief. De tank heeft een totaal gewicht van 125 kg. Hij wordt gedragen door een beugel, bestaande uit twee ringen, verbonden door twee stalen buizen. De beugel is om een horizontale as draaibaar gelagerd in het brugstuk van het statief. De beweging om deze dwarsas, waardoor de tank min of meer rechtop kan worden gezet, wordt bewerkstelligd door een kruk in een der ringen (links in fig. 1). Draaiing is mogelijk over 90° in de richting waarbij de kathode van de röntgenbuis boven komt te staan, en over 45° in de andere richting. De

Het brugstuk van het statief is, rijdend op kogellagers en gebalanceerd met gewichten die in de verticale buizen lopen, langs deze buizen op en neer te bewegen. Voorts kan de as van de ophangbeugel meer of minder ver worden uitgetrokken, en is de beugel in horizontale richting langs de pijpen van het brugstuk verschuifbaar.

Fig. 8 geeft een overzicht van de bereikbare verplaatsingen met de genoemde vijf vrijheidsgraden van beweging. Men ziet dat den medicus alle wenselijke instelmogelijkheden zijn geboden. Zo kan men bijv. ook zeer gemakkelijk bestralingen in opwaartse richting doen plaats hebben (zg. ondertafel-bestraling).

Stabilisatie, regeling en meting van spanning en stroom

Voor het slagen van een behandeling met röntgenstralen is het een eerste vereiste de toe te dienen straling nauwkeurig te doseren. De medicus moet er hiertoe op kunnen vertrouwen dat de buisstroom en de buisspanning, waarmede hij de intensiteit en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de hardheid van de opgewekte röntgenstralen instelt, door de meetinstrumenten exact worden aangegeven en tijdens een bestraling niet aan variaties onderhevig zijn.

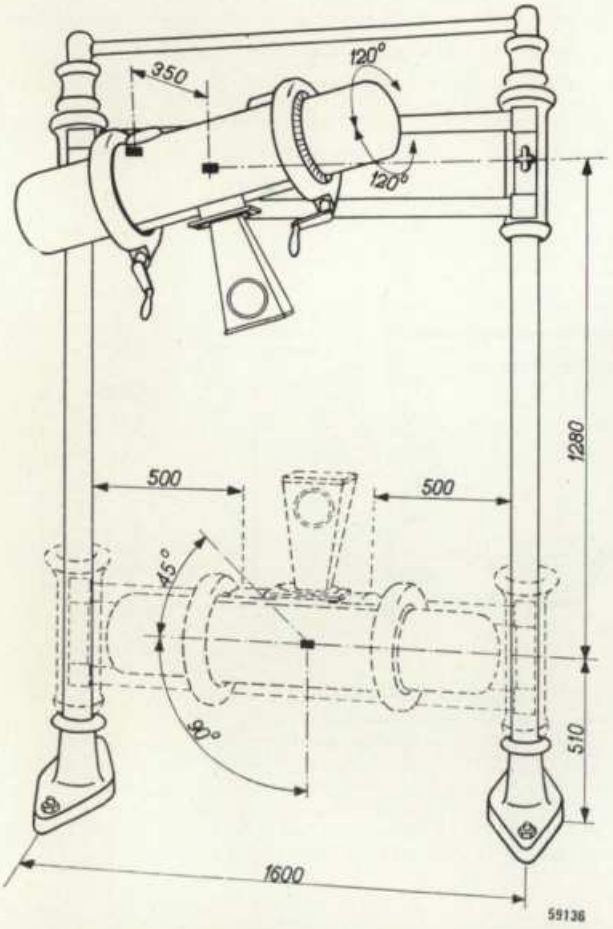


Fig. 8. Bewegingsmogelijkheden van het apparaat, opgehangen aan het statief: draaiing om lengte-as (240°), draaiing om horizontale dwarsas (135°), verschuiving in de richting van deze dwarsas (350 mm), horizontale verschuiving loodrecht hierop langs brugstuk (1000 mm), verticale verschuiving (1280 mm). Gestippeld is de stand voor een bestraling in opwaartse richting aangegeven.

Beschouwen we eerst de meting. Aan de geaarde zijde van de secundaire wikkeling van elk der beide hoogspanningstransformatoren is een draaispoelinstrument aangesloten, hetwelk rechtstreeks de gelijkstroom meet die door de röntgenbuis vloeit; zie *fig. 9*. Dat hier twee meters gebruikt worden om dezelfde stroom te meten, dient om foutieve bestralingen te voorkomen bij defect raken van een der meters — een veiligheidsmaatregel die in verscheidene landen is voorgeschreven. Het meten van de spanning op de röntgenbuis is niet rechtstreeks, in het hoogspanningsgedeelte, mogelijk. Men meet dus de primaire spanning van de hoogspanningstransformatoren; door vermenigvuldiging met de overbrengverhouding volgt hieruit de secundaire spanning die bij nullast zou optreden. Deze nullastspanning echter is de som van de eigenlijke buisspanning en de spanningsval in de transformatoren, welke spanningsval evenredig is met de buisstroom. Men kan nu toch een directe, niet door variaties van de stroom beïnvloede aanwijzing van de buisspanning verkrijgen met behulp van een meetschakeling die eveneens in fig. 9 is te zien. Op de voltmeter kV staat de primaire spanning, verminderd met een correctiespanning die de kleine transformator T_4 op de weerstand R_4 veroorzaakt. Deze correctiespanning is evenredig met de primaire stroom der hoogspanningstransformatoren, welke door T_4 vloeit, en daarmee ook vrijwel evenredig met de buisstroom. Door juiste afstelling van R_4 bereikt men aldus dat de voltmeter rechtstreeks in kilovolt buisspanning kan worden geijkt.

Het instellen van de voor een bestraling gewenste waarden van buisstroom en buisspanning geschiedt van ouds door middel van een variabele weerstand in serie met de primaire wikkeling van de gloeistroomtransformator, resp. door middel van een regeltransformator die de primaire wikkeling van de hoogspanningstransformator voedt (vgl. fig. 5). In principe hebben wij dezelfde weg gevolgd, echter met toevoeging van hulpmiddelen die de ingestelde waarden van stroom en spanning binnen nauwe grenzen stabiliseren ten opzichte van netspanningsvariaties en eventuele andere storingen. Men moet rekening houden met netspanningsvariaties tot 10%. Zonder stabilisatie varieert de buisspanning evenredig met de netspanning, de buisstroom zelfs met een hoge macht van de netspanning, ten gevolge van de sterke temperatuurafhankelijkheid van de emissie van de gloeidraad. Bovendien kan de emissie ook in zekere mate variëren door absorptie aan de gloeidraad van eventuele verontreinigingen die uit de anode vrijkomen. Hieruit blijkt hoe belangrijk een goede stabilisatie van stroom en spanning is, te meer als men bedenkt dat de intensiteit van de verkregen röntgenstraling, waar het ten slotte om begonnen is, evenredig is met de buisstroom en ruwweg evenredig met het kwadraat van de buisspanning.

Wat betreft de buisstroom, komt de toegepaste stabilisatieschakeling in wezen overeen met een die reeds eerder werd beschreven [5]). In de primaire keten van de gloeistroomtransformator is, onder tussenschakeling van een scheidingstransformator, opgenomen de „weerstand" van een penthode (verhouding van anodespanning tot anodestroom); zie fig. 9. Deze weerstand hangt af van de stuurroosterspanning. Aan het stuurrooster wordt nu toege-

[5]) Philips techn. T. **8**, 8, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voerd de spanning die de stroom door de röntgenbuis veroorzaakt aan de weerstand R_5, verminderd met een zeer constante „vergelijkingsspanning" E_0. Eventuele variaties van de buisstroom werken dus via de penthode terug op de gloeispanning van de röntgenbuis, en wel in zodanige richting en met zodanige sterkte dat de gemiddelde buisstroom binnen ca 1% constant gehouden wordt. (In feite bestaat de spanning op de weerstand R_5 uit impulsen, in verband met de wisselspanningsvoeding van de

Voor het stabiliseren van de hoogspanning is wat grover geschut nodig dan een enkele electronenbuis. Hier wordt gebruik gemaakt van een kleine asynchrone motor, die de borstelbrug van de bovengenoemde regeltransformator voor de voeding van de hoogspanningstransformator aandrijft. Een regelschakeling doet de motor in de ene of in de andere richting draaien naar gelang de buisspanning hoger dan wel lager is dan een vooraf ingestelde waarde. Hoe de regelschakeling werkt, kan wederom aan de

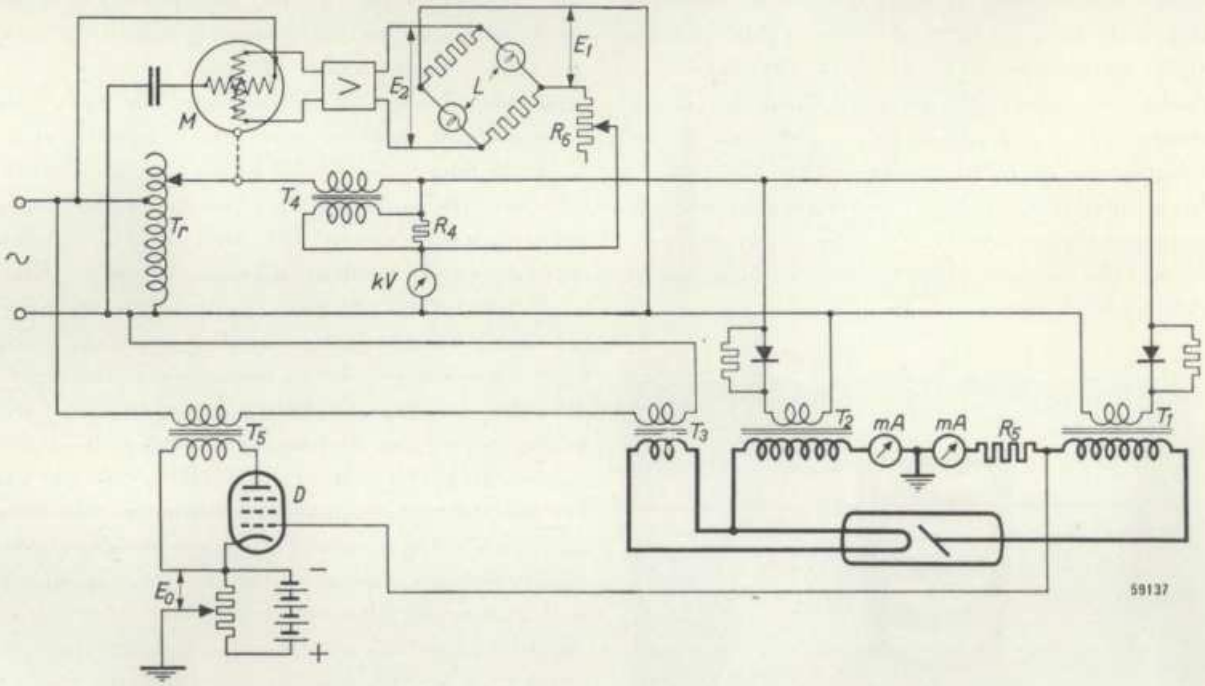


Fig. 9. Schakeling voor het meten, regelen en stabiliseren van buisstroom en buisspanning. De buisstroom wordt gemeten met de beide draaispoelmeters „mA", de buisspanning met de in kilovolt geijkte voltmeter „kV".

Voor de stabilisatie van de buisstroom: D penthode, waarvan de „weerstand" via de scheidingstransformator T_5 in serie staat met de gloeistroomtransformator T_3; R_5 weerstand waarop de buisstroom een spanning veroorzaakt, die als stuurroosterspanning aan D wordt toegevoerd; E_0 instelbare vergelijkingsspanning, eenvoudigheidshalve aangegeven als afkomstig van een batterij. (In werkelijkheid wordt E_0 geleverd door een kleine, op het net aangesloten gelijkrichter met gestabiliseerde uitgangsspanning.)

Voor de stabilisatie van de buisspanning: L twee gloeilampjes die met twee normale weerstanden een brug vormen, E_1 ingangsspanning op deze brug, evenredig met de buisspanning, E_2 uitgangswisselspanning, die in fase omklapt als E_1 de nominale waarde passeert, M asynchrone motor die de borstelbrug van de regeltransformator T_r voor de primaire spanning der hoogspanningstransformatoren T_1, T_2 aandrijft.

röntgenbuis. Deze impulsspanning wordt echter, alvorens aan het stuurrooster van de penthode te worden toegevoerd, afgevlakt door een in de figuur niet aangegeven R-C-schakeling. Zodoende werkt de regeling alleen op het gemiddelde van de buisstroom.) Daar de vergelijkingsspanning E_0 instelbaar is gemaakt, heeft men het in de hand te bepalen bij welke spanning op R_5 een evenwicht wordt bereikt, en is dus via hetzelfde mechanisme de gewenste regelbaarheid van de buisstroom verkregen: deze kan naar wens tussen 2 en 10 mA worden ingesteld.

hand van fig. 9 worden toegelicht. Twee normale weerstanden en twee gloeilampjes vormen de vier takken van een brugschakeling. De gloeilampjes fungeren als weerstanden waarvan de waarde sterk varieert met de aangelegde wisselspanning E_1 (nl. door de vrij grote variatie van de gloeitemperatuur). De brug is daardoor alleen in evenwicht bij een bepaalde waarde van E_1, d.i. een bepaalde waarde van de buisspanning; de uitgangswisselspanning E_2 is dan nul. Bij afwijkende waarde van E_1 wordt een wisselspanning $E_2 \neq 0$ verkregen, en wel verschilt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze bij te grote E_1 180° in fase ten opzichte van het geval van te kleine E_1. De spanning E_2 wordt versterkt en aan een der beide veldwikkelingen van de genoemde asynchrone motor toegevoerd, terwijl de andere veldwikkeling (via een condensator voor de vereiste fasedraaiing) op het net is aangesloten. Daar de draairichting van de motor bij omklappen van de fase van E_2 omkeert, kan men door dit mechanisme elke variatie van E_1 ten opzichte van een voorgeschreven waarde een tegenwerkende verandering in de regeltransformator doen veroorzaken. In de practijk is het mogelijk gebleken de hoogspanning aldus te stabiliseren tot op 0,9%, hetgeen voor het beoogde doel voldoende is.

Zoals men in het schema ziet, wordt de „stuurspanning" E_1 op dezelfde wijze verkregen als de spanning voor de in kV geijkte voltmeter. Ook E_1 is dus gecorrigeerd voor de spanningsval in de hoogspanningstransformatoren, en is dus werkelijk evenredig met de buisspanning. De buisspanning (in de werkfase) blijft derhalve constant, ook als men de buisstroominstelling verandert. Met behulp van de weerstand R_6 kan men de buisspanning waarbij de regelschakeling tot rust komt, willekeurig instellen tussen 80 en 200 kV_{max}.

Fig. 10. Bovenaanzicht van de bedieningslessenaar. Onderste rij op de dekplaat: regelschijf voor de buisstroom (links) instelknop voor de buisspanning (midden) en regelschijf (rechts) die direct met de regeltransformator voor de buisspanning is gekoppeld, doch welke normaal niet met de hand behoeft te worden bediend. Daarboven: toetsen voor het in- en uitschakelen van de netspanning (links) en van de hoogspanning (rechts), alsmede voor het kiezen van drie standaardstralenkwaliteiten. Vervolgens: rij van tien signaallampjes die aangeven welk filter in gebruik is. In de „metertoren": kilovolt- en twee milliampèremeters, en drie signalen, met groen, wit en rood licht, die respectievelijk aangeven of de netspanning, de waterkoeling en de hoogspanning zijn ingeschakeld.

De in dit hoofdstuk beschreven apparatuur is, met nog andere accessoires, ondergebracht in een bedieningslessenaar, waarvan *fig. 10* een close-up geeft. De functie van de verschillende op de dekplaat zichtbare knoppen, meters enz. wordt in het onderschrift toegelicht. We willen slechts even stilstaan bij een bijzonderheid, die in verband staat met de stabilisatie van de buisspanning. Midden op de lessenaar ziet men een rij toetsen, waarvan de twee meest linkse dienen voor het in- en uitschakelen van de netspanning, de twee meest rechtse voor het in- en uitschakelen van de hoogspanning, die dan nog vrij kan worden gekozen. De middelste drie toetsen echter dienen ieder voor het kiezen van één uit drie gestandaardiseerde stralenkwaliteiten. Hierbij wordt nl. telkens de buisspanningsregeling op een bepaalde, bij aflevering van het apparaat vastgelegde waarde ingesteld, en tevens wordt een vergrendeling in werking gesteld, die het aanleggen van de hoogspanning aan de röntgenbuis alleen toelaat bij inschakeling van een bepaald filter uit de serie van tien die bij het apparaat behoren (zie het laatste hoofdstuk). Bij voorbeeld kunnen de drie toetsen corresponderen met de volgende drie spanningen en toegevoegde filters:

80 kV_{max} en 0,5 mm Al (oppervlakte-therapie)
140 kV_{max} en 3,0 mm Al (intermediaire therapie)
200 kV_{max} en 0,5 mm Cu + 1,0 mm Al (diepte-therapie).

Deze automatisering van de keuze der bestralingstechniek is practisch slechts mogelijk geworden door de beschreven, automatisch werkende stabilisatie van de buisspanning. Zij kan voor de gebruiker een groot gemak zijn, aangezien deze toch al zo vele variabelen voor elke bestraling moet vastleggen: buisspanning, buisstroom, bestralingstijd, filter, focus-huid-afstand, grootte van het te bestralen veld, en richting van de stralenbundel ten opzichte van het object.

Bestralingstubi en filters

De gekozen focus-huid-afstand en veldgrootte kan de medicus op eenvoudige wijze realiseren met behulp van één uit een reeks van 15 bestralingstubi, die bij de installatie behoren (zie fig. 1) en waarvan er twee in *fig. 11* zijn te zien. Zulk een tubus [6]) bevat in de cirkelronde flens, waarmee hij

[6]) De tubi zijn uitgevoerd naar aanwijzingen van Dr. G. J. van der Plaats, Maastricht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

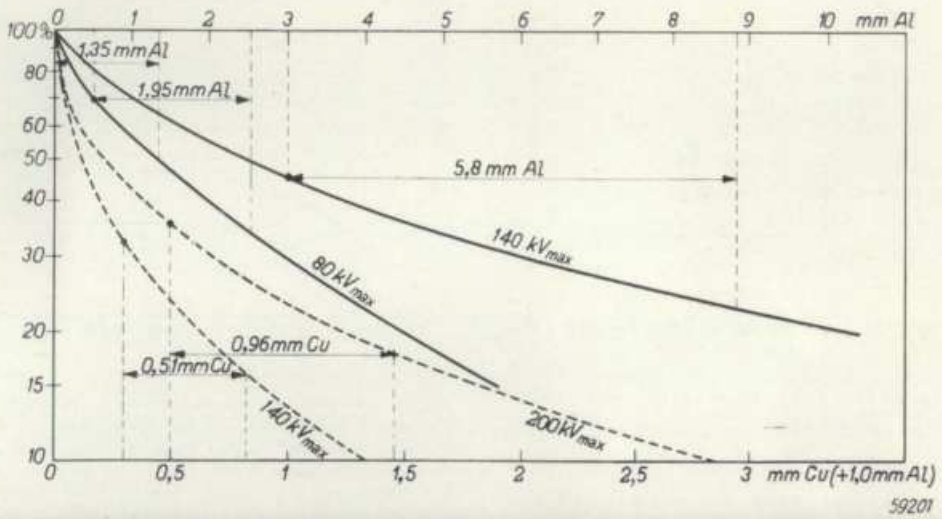
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

59025

Fig. 11. Twee bestralingstubi, beide voor een focus-huid-afstand van 50 cm; de liggende tubus rechts, die het loden diafragma in de flens laat zien, geeft een veldgrootte van 15 × 20 cm², de staande tubus links, bevestigd op de filterzekering, die normaal voor het uittreevenster van de tank is geschroefd, geeft een veldgrootte van 10 × 15 cm². In de filterzekering is een filter half ingeschoven, een ander filter ligt er naast.

aan het apparaat wordt bevestigd, een loden diafragma, dat de nuttige stralenbundel beperkt tot de doorsnede nodig voor het gewenste veld. De tubi hebben drie verschillende lengten, corresponderend met de meest gebruikte focus-huid-afstanden van 30, 40 en 50 cm. Men kan de tubus rechtstreeks met het vrije einde, dat door een bolvormig gekromde plastieken kap is afgesloten, tegen de huid van de patient leggen, desgewenst ook stevig er in drukken, waarbij de juiste focus-huid-afstand gehandhaafd blijft. De openingshoek van de flanken van elke tubus is zo gekozen dat elk punt van het te bestralen veld (maar ook alléén hiervan) het gehele focus ziet. Punten van een klein omringend veld (de halfschaduw van het diafragma) „zien" dan nog wel (door de tubuswand heen) een deel van het focus en zouden dus ook een, zij het geringere, stralingsintensiteit ontvangen. Om dit te verhinderen, zijn de flanken der tubi van binnen met lood bekleed. De grote tubi bevatten in de flanken kijkopeningen, die afgesloten zijn met loodglas, en openingen voor het inzetten van een ionisatiekamer voor meting van de dosis.

Er is hierboven al sprake geweest van het gebruik van bepaalde filters in de stralenbundel. Zoals bekend mag worden ondersteld, dienen deze er toe de hardheid van de toegediende stralen te verhogen, door onderdrukking van de zachtste componenten in het röntgenstralenspectrum; zie *fig. 12*. Natuurlijk kan men daarbij de straling



59201

Fig. 12. Laat men de straling van het „Compactix"-apparaat, verkregen bij buisspanningen van 80, 140 en 200 kV_{max}, een laag aluminium of koper doorlopen, dan daalt de intensiteit volgens de getekende krommen (getrokken lijnen: Al; gestippelde lijnen: Cu inclusief 1,0 mm Al). Men ziet dat de straling in de laag niet alleen wordt verzwakt maar dat zij tevens harder wordt: de helling van de kromme wordt met toenemende laagdikte (filter) kleiner. Men geeft de hardheid aan door de halveringsdikte, d.i. de laag Al of Cu die de intensiteit van de reeds gefilterde straling tot de helft reduceert; tot 140 kV gebruikt men aluminium filters en geeft men de halveringsdikte in mm Al aan, boven 140 kV werkt men met koperen filters en drukt dan ook de halveringsdikte in mm Cu uit. De ongefilterde straling van het „Compactix"-toestel heeft bij 80 kV_{max} een halveringsdikte $H = 1{,}35$ mm Al (voor verschillende soorten therapie-apparaten varieert deze waarde naar gelang van de toegepaste spanningsvorm en het eigen filter). Bij een extra filter van 0,5 mm Al stijgt H tot 1,95 mm Al. Bij 140 kV_{max} en een filter van 3,0 mm Al is $H = 5{,}8$ mm Al, bij 140 kV_{max} en een filter van 0,3 mm Cu + 1,0 Al is $H = 0{,}51$ mm Cu. Ten slotte heeft men bij 200 kV_{max} en een filter van 0,5 mm Cu + 1,0 mm Al een halveringsdikte $H = 0{,}96$ mm Cu.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

niet harder maken dan beantwoordt aan de kortgolvige grens van het spectrum, die bepaald wordt door de buisspanning. Bovendien kan men bij een gegeven spanning het filter niet al te zwaar kiezen, omdat het filter ook de harde componenten verzwakt en men voldoende intensiteit moet overhouden. Voor elke buisspanning komen derhalve slechts enkele van de reeks normale filterdikten in aanmerking. Bij het „Compactix"-apparaat" behoort een serie van tien verschillende filters, waarmee men alle gebruikelijke combinaties van spanningen (tot 200 kV) en filters kan verwezenlijken; zie het onderstaande tabelletje.

Tabel I. Filters, behorende bij het „Compactix"-apparaat. Voor elke bestraling moet een filter worden ingezet, ook voor een bestraling waarbij men slechts met het onvermijdelijke eigen filter van het apparaat wil werken; in dit laatste geval kiest men filter No. 1. Aldus is voorkomen dat de gebruiker soms zou vergeten bewust een filter te kiezen en per ongeluk zonder extra filter zou werken. Het filter No. 10 wordt gebruikt om de vensteropening af te sluiten voor het geval dat bedienend personeel in de nabijheid van het werkende apparaat bezig moet zijn. Filter No. 9 is het bekende samengestelde filter volgens Thoraeus, dat een kleinere totale absorptie heeft dan het wat hardheid van de straling betreft aequivalente koperfilter.

No.	Samenstelling en dikte
1	0,0 mm —
2	0,5 mm Al
3	1,0 mm Al
4	2,0 mm Al
5	3,0 mm Al
6	0,3 mm Cu + 1,0 mm Al
7	0,5 mm Cu + 1,0 mm Al
8	1,0 mm Cu + 1,0 mm Al
9	0,4 mm Sn + 0,25 mm Cu + 1,0 Al
10	5,0 mm Pb

Elk filter is gevat in een metalen raampje, dat geschoven kan worden in de sleuf van de zg. filterzekering (zie fig. 11). Dit apparaatje, dat op de vensteropening van de tank is geschroefd, bevat een palmechanisme, dat het tegen een veerdruk ingeschoven filterraampje aan het einde van zijn slag vasthoudt, resp. bij drukken op de pal weer loslaat. Verder bevat de filterzekering een stel contacten, die in verschillende combinaties door de filterraampjes worden gesloten en die twee functies hebben: ten eerste een ver- en ontgrendeling van de hoogspanning; deze kan niet worden ingeschakeld als men vergeten heeft een filter in te zetten. Ten tweede een signalering naar de bedieningslessenaar; elk filter doet één van een rij van tien signaallampjes oplichten, zodat de bedienende persoon ziet welk filter zich in het apparaat bevindt.

De invloed van de hardheid der straling (stralenkwaliteit) willen wij nog in het kort toelichten. Bij de bestraling van aandoeningen van de huid is het zaak de onderliggende weefsels te sparen en dus een zachte straling te gebruiken, die in de bovenste lagen van het lichaam al vrijwel geheel wordt geabsorbeerd. Voor deze „oppervlaktetherapie" kiest men dus de laagste spanning, 80 kV_{max}, en géén filter, of nauwkeuriger: het filter No. 1, dat geen absorberend materiaal bevat, zodat alleen het onvermijdelijke eigen filter van het apparaat werkzaam is. Bij de bestraling van diep gelegen tumoren daarentegen is een harde straling gewenst, om een behoorlijk groot „dieptequotient" te verkrijgen, dwz. een grote verhouding tussen de intensiteit op de gegeven diepte onder de huid en de intensiteit op de huid zelf (welke verhouding in normale gevallen ten gevolge van de absorptie in het lichaam en ten gevolge van de kwadratische intensiteitsafneming met de afstand kleiner blijft dan 1). Men zal dus voor dit geval een hoge buisspanning en een zwaar filter kiezen, hoger en zwaarder naarmate het object dieper onder de huid ligt. De vraag ligt nu voor de hand, welke verbetering in het dieptequotient met toenemende hardheid van de straling wordt bereikt. Een antwoord hierop geeft

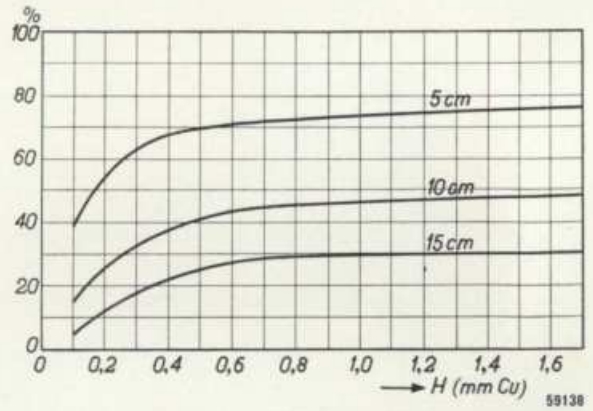


Fig. 13. Dieptequotient op drie verschillende diepten onder de huid, als functie van de halveringsdikte H der straling. De focus-huid-afstand, die het dieptequotient door de kwadratische intensiteitsafneming beïnvloedt, is hier op 50 cm gesteld. De veldgrootte is eveneens van invloed, aangezien de secundaire straling op diepten vergelijkbaar met de veldafmetingen een egalisatie van de intensiteit bevordert; bij de weergegeven krommen bedroeg de veldgrootte 400 cm². (Afgeleid uit: L. Grebe en K. Nitzge, Tabellen zur Dosierung der Röntgenstrahlen, Urban & Schwarzenberg, Berlijn en Wenen 1930.)

fig. 13, waarin het dieptequotient op drie verschillende diepten, voor een bepaalde focus-huid-afstand en een bepaalde veldgrootte, als functie van de hardheid is uitgezet. Als maat voor de hardheid is daarbij gebruikt de in fig. 12 gedefinieerde halveringsdikte. Men ziet de sterke toeneming

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van het dieptequotient tot halveringsdikten van ca 0,8 mm Cu. Bij nog grotere waarden van de halveringsdikte is de verdere winst in dieptequotient betrekkelijk gering en nauwelijks van belang in vergelijking tot de veel grotere winst die men in vele gevallen kan verkrijgen door compressie van de weefsels, waardoor de diepte van de tumor kunstmatig wordt verminderd. De maximale halveringsdikte die men practisch met het „Compactix"-apparaat kan verwezenlijken, is 0,96 mm Cu, verkregen bij 200 kV_{max} en met een filter van 0,5 mm Cu en 1,0 mm Al, waarbij de doseringssterkte met 10 mA en op 50 cm afstand 20 röntgen per minuut bedraagt.

Eerst bij buisspanningen van een geheel andere orde, bijv. enige millioenen volt, is er sprake van essentieel grotere dieptequotienten, zelfs aanzienlijk groter dan 1. De secundaire röntgenstralen en electronen, die in het menselijk lichaam worden opgewekt en die ook tot de totale dosis bijdragen, zijn nl. bij toenemende spanning in toenemende mate naar voren gericht. Daardoor komt in de dosis, als functie van de diepte onder de huid uitgezet, op een bepaalde diepte een maximum. Bij spanningen van 200 kV is zulk een maximum reeds te bespeuren, het is echter weinig geprononceerd en ligt slechts ca 1 cm onder het huidoppervlak; bij zeer hoge spanningen wordt het maximum behoorlijk hoog en kan het op diepten van bijv. 10 cm of meer komen te liggen.

Samenvatting. Beschrijving van het „Compactix"-apparaat voor röntgentherapie, dat werkt met wisselspanning tot 200 kV_{max} en een buisstroom tot 10 mA. De hoogspanningsgenerator is samen met de röntgenbuis in een cylindrische tank gemonteerd, die 1,20 m lang is en 125 kg weegt. De tank wordt opgehangen aan een statief met vijf vrijheidsgraden van beweging en is gemakkelijk voor elke bestraling in te stellen. Enige bijzonderheden van de constructie zijn: splitsing van de hoogspanningstransformator in twee eenheden voor 100 kV, die aan weerskanten van de röntgenbuis worden geplaatst, zodat het focus van de buis in het zwaartepunt van de tank ligt; drie gescheiden compartimenten in de tank, voor de buis en de beide transformatoren; isolatie en koeling van de buis met vrij rondstromende olie; isolatie van de transformatoren met papier in olie geïmpregneerd; koeling van de olie in alle drie compartimenten met koelwaterspiralen die geaard zijn en op de waterleiding worden aangesloten, dus géén gebruikmaking van oliepompen of dergelijke; volledige bescherming van de gebruiker tegen röntgenstralen buiten de nuttige kegel, door een wolfraam dop op de anode en een 1 mm dikke laag lood in het omhulsel, met een totale loodaequivalentie van 5 mm lood; voeding van de hoogspanningstransformatoren met „keerspanningsonderdrukking"; meting van de buisspanning met automatische correctie voor de invloed van de buisstroom; stabilisatie van buisstroom en buisspanning binnen ca 1%, met speciale schakelingen die rechtstreeks door de stroom resp. de spanning worden bestuurd; op de bedieningslessenaar, behalve de normale regelmogelijkheden voor stroom en spanning, o.a. drie toetsen voor keuze van drie gestandaardiseerde stralenkwaliteiten, en een signalering van het in gebruik zijnde filter. Bij het apparaat behoort een serie van 15 bestralingstubi, die een gemakkelijk vastleggen van de focus-huid-afstand en van de te bestralen veldgrootte veroorloven, alsmede een reeks van 10 filters. De maximale halveringsdikte, die men verkrijgt met een buisspanning van 200 kV_{max} en een filter van 0,5 mm koper met 1,0 mm aluminium, bedraagt 0,96 mm koper. Hierbij, en bij een buisstroom van 10 mA, is de doseringssterkte op 50 cm afstand 20 röntgen per minuut.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN MILLIVOLTMETER VOOR HET FREQUENTIEGEBIED VAN 1000 TOT 30·10⁶ PER/SEC

door H. J. LINDENHOVIUS, G. ARBELET en J. C. van der BREGGEN.

621.317.725:621.3.027.213.7:
621.3.027.4:621.3.029.45:621.3.029.5

Voor metingen aan toestellen waarin spanningen van zeer uiteenlopende grootte en frequentie voorkomen, als radiozend- en ontvangapparatuur, installaties voor draaggolftelefonie, enz., bestaat behoefte aan een spanningsmeter met een grote, naar wens te verminderen, gevoeligheid en een frequentiegebied dat zich uitstrekt van audiofrequenties af tot radiofrequenties van enige tientallen Mper/sec. Met het hier beschreven meetinstrument, dat in wezen bestaat uit een regelbare verzwakker, een versterker, een gelijkrichter en een draaispoelmeter, wordt getracht in deze behoefte te voorzien.

Voor het meten van wisselspanningen volgens een reeds lang bekend systeem wordt de spanning gelijkgericht (met behulp van een diode of een kristaldetector), en de gelijkgerichte spanning gemeten met een draaispoelinstrument. Een van de voordelen van zulk een systeem is dat de aanwijzing binnen zeer wijde grenzen onafhankelijk van de frequentie kan worden gemaakt; met enige voorzorgen laat zich bijv. een frequentiegebied van 20 per/sec tot omstreeks 500·10⁶ per/sec bestrijken. Daar staat echter tegenover dat meters volgens dit systeem betrekkelijk ongevoelig zijn: voor de volle uitslag is een spanning vereist die in de grootteorde van minstens 1 V moet liggen (op dit punt komen wij nog terug). Het ligt voor de hand, vóór de meter een versterker te schakelen, ten einde eveneens kleinere spanningen te kunnen meten. Deze gedachte is verwezenlijkt in instrumenten die reeds bij een fractie van 1 mV de volle uitslag geven, doch bij de tot dusverre in de handel zijnde instrumenten is deze zeer grote gevoeligheid verkregen ten koste van het frequentiegebied, dat dan nog maar een bandbreedte van ongeveer 10 000 per/sec omvat.

In het onderstaande beschrijven wij een instrument (type GM 6006) waarvan de versterker zodanig is geconstrueerd dat het frequentiegebied nog zeer ruim is (van 1000 tot 30·10⁶ per/sec), terwijl de volle uitslag wordt verkregen bij een ingangsspanning van 1 mV. Ten einde de versterking, die ca 1500 × bedraagt, in een zo groot frequentiegebied van de frequentie onafhankelijk te houden, dient, zoals nader zal blijken, de versterking per trap gering te zijn, zodat men een vrij groot aantal trappen nodig heeft. Hierbij doen zich problemen voor als het stabiliseren van de versterking, het ruisen en het ontwerpen van een eenvoudige ijkinrichting waarmee het instrument te allen tijde kan worden geijkt.

Fig. 1 is een foto van het bedoelde instrument. Het is voorzien van een nader te bespreken verzwakker, die het mogelijk maakt spanningen tot 1 kV te meten.

De versterker

Bovenste grens van het frequentiegebied

De versterker bestaat uit zes trappen, die ieder zijn uitgerust met een penthode EF 42. De eerste vijf trappen zijn, op enige ondergeschikte punten na, onderling identiek. De zesde trap, die anders is belast dan de voorafgaande, en daarom ook iets anders is ingericht, laten wij nog even buiten beschouwing.

In *fig. 2a* is één van de vijf versterkertrappen weergegeven (zonder de gelijkspanningsbronnen). In fig. 2*b* is de schakeling opnieuw getekend met alleen die schakelelementen die in wezen de ver-

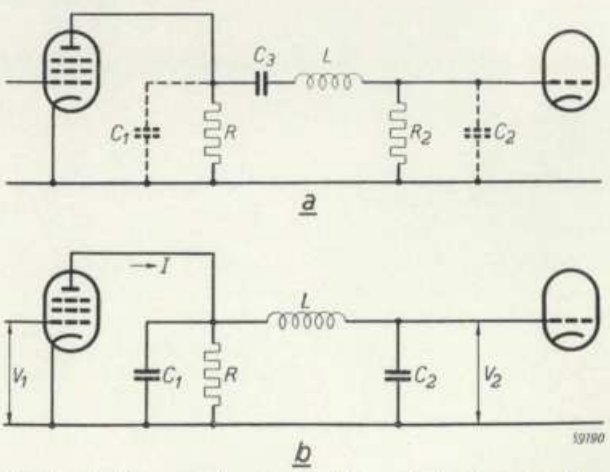


Fig. 2. *a*) Een van de eerste vijf versterkertrappen. R = anodekoppelweerstand, R_2 = roosterweerstand, C_1 = uitgangscapaciteit van de voorafgaande buis, plus enige parasitaire capaciteit, C_2 = ingangscapaciteit van de volgende buis, plus enige parasitaire capaciteit, C_3 = koppelcondensator, L = zelfinductie ter verhoging van de bovenste grensfrequentie. *b*) Hetzelfde, doch met weglating van de schakelelementen welker grootte op de versterking bij hoge frequenties geen invloed heeft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

58877

Fig. 1. Millivoltmeter type GM 6006, met op de voorgrond de bijbehorende verzwakker. Op het schakelpaneel, van links naar rechts: aansluitbussen voor een ingangsspanning van max. 1 mV, omschakelaar, stopcontact waarop de verzwakker is aangesloten, signaallampje, netschakelaar en aansluitbussen waarop een spanning beschikbaar is (max. 0,5 V) die 500 maal zo groot is als de ingangsspanning. De omschakelaar heeft drie standen: 1) „Direct" (verzwakker buiten werking, voor spanningen tot 1 mV), 2) „10^{-3}-10^{3} V" (met verzwakker) en 3) „Contr." (ijkstand).

De bovenste en de middelste schaal verschillen onderling een factor $\sqrt{10}$; welke schaal dient te worden gebruikt en met hoeveel factoren 10 de aflezing dient te worden vermenigvuldigd om de te meten spanning in mV of V te geven, hangt af van de stand van de verzwakker. De onderste schaal is geijkt in decibel; 0 db ligt bij 0,775 V (overeenkomend met 1 mW in een weerstand van 600 ohm).

sterking bij hoge frequenties bepalen, te weten: de buis, de anodeweerstand R, de spoel L (de bedoeling waarmee deze is aangebracht, zal aanstonds blijken), alsmede de capaciteiten C_1 en C_2 die grotendeels bestaan uit de uitgangscapaciteit van de voorafgaande, resp. de ingangscapaciteit van de volgende buis, vermeerderd met enige parasitaire capaciteit.

Voor het geval $L = 0$ bestaat de volgende betrekking tussen de wisselspanning V_2 (met hoekfrequentie ω) op het rooster van de rechterbuis en de anodewisselstroom I van de linkerbuis (V_2 en I in absolute waarde):

$$V_2 = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega C_p R)^2}} \cdot I.$$

Hierin is $C_p = C_1 + C_2$.

Is V_1 de wisselspanning op het rooster van de linkerbuis, en S de steilheid van deze buis, dan is $I = SV_1$, zodat, als we $\omega C_p R = x$ stellen, de versterking V_2/V_1 van deze trap is:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{SR}{\sqrt{1 + x^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

In *fig. 3* geeft de gestippelde kromme het verloop van $V_2/V_1SR = 1/\sqrt{1 + x^2}$ weer als functie van x, waarbij x een maat is voor de frequentie. Men ziet het welbekende verschijnsel optreden dat bij hoger wordende frequentie de versterking afneemt, ten gevolge van de capaciteit die zich parallel aan R bevindt.

Laten we voorlopig per trap een daling van bijv. 5% toe (hetgeen bij zes trappen een daling van 27% van de totale versterking betekent), dan wordt, naar uit de gestippelde kromme in fig. 3 blijkt, deze grens bereikt bij $x = \omega C_p R = 0{,}33$. Om een hoge grensfrequentie te krijgen, dient men C_p en R

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

klein te houden. Nu is C_p, ook bij doelmatige keuze en montage der onderdelen, niet kleiner te krijgen dan ca 20 pF, terwijl de waarde van R is gebonden aan de nominale versterking per trap ($= SR$) en de steilheid. Deze laatste bedraagt, bij de gebruikte

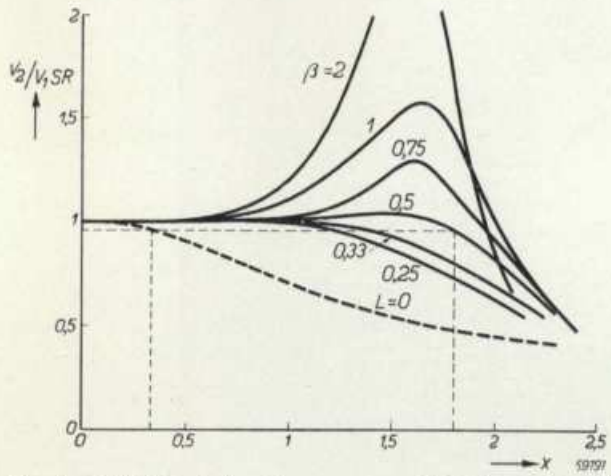


Fig. 3. V_2/V_1SR als functie van $x = \omega C_p R$. De gestippelde kromme geldt voor $L = 0$ (formule (1)), de getrokken lijnen gelden voor L volgens (3), met $\beta = C_1/C_2$ als parameter (formule (4)). Op een zekere schaal geven de krommen de versterking per trap (V_2/V_1) als functie van de frequentie weer. De beste karakteristiek wordt verkregen met $\beta \approx 0{,}5$.

„Rimlock"-penthode EF 42, maximaal 9,5 mA/V, doch met het oog op enige reserve en regelmogelijkheid worden de buizen ingesteld op $S = 8{,}0$-$8{,}5$ mA/V. Voor een versterking van bijv. 3 per trap — veel lager zal men toch niet willen gaan — is dus een anodeweerstand van 370 ohm nodig. Voor de bovenste grens f_{max} van het frequentiegebied vindt men dan:

$$f_{max} = 0{,}33/(2\pi \cdot 20 \cdot 10^{-12} \cdot 370) \text{ per/sec} \approx 7 \text{ Mper/sec.}$$

Een aanzienlijk hogere grensfrequentie laat zich bereiken door toevoegen van een spoel met geschikt gekozen zelfinductie L (fig. 2). Een eenvoudige berekening leert, dat voor de schakeling volgens fig. 2 geldt:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{SR}{\sqrt{(1-\omega^2 LC_2)^2 + (1-\omega^2 LC_s)^2 \cdot \omega^2 C_p{}^2 R^2}}, \quad (2)$$

waarin $C_s = C_1C_2/(C_1 + C_2) = C_1C_2/C_p$. Onder het wortelteken komen, behalve de constante term 1, een term voor met ω^2, een met ω^4 en een met ω^6. Laat men ω van een lage waarde af stijgen, dan is het in het algemeen aanvankelijk de term met ω^2 die de noemer van (2) het sterkst doet veranderen. Deze term is:

$$(C_p{}^2R^2 - 2LC_2)\omega^2 .$$

Men kan hem doen verdwijnen door er voor te zorgen dat $C_p{}^2R^2 = 2LC_2$, dus door te kiezen:

$$L = \frac{C_p{}^2R^2}{2C_2} = \frac{1+\beta}{2} C_p R^2, \quad \ldots \quad (3)$$

als $\beta = C_1/C_2$. Met deze waarde van L gaat (2) over in:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{SR}{\sqrt{1 + (\frac{1}{4} - \frac{\beta}{1+\beta})x^4 + \frac{1}{4}(\frac{\beta}{1+\beta})^2 x^6}}, \quad . \quad (4)$$

waarin weer $x = \omega C_p R$.

De getrokken lijnen in fig. 3 stellen V_2/V_1SR voor als functie van x, voor enige waarden van de parameter β. Men ziet, dat nu de versterking binnen 5% constant blijft tot een waarde van x die ongeveer 1,8 bedraagt, indien men $\beta \approx 0{,}5$ kiest. Met andere woorden: door een juiste keuze van L en van C_1/C_2 kan men, met dezelfde nominale versterking per trap ($3\times$) en met dezelfde buizen, een ruim vijfmaal zo hoge grensfrequentie bereiken als zonder L, namelijk ca 38 Mper/sec.

Het komt er dus op aan dat de verhouding der capaciteiten C_1 en C_2 de juiste waarde heeft. Zoals gezegd, bestaan zij in hoofdzaak uit de uitgangscapaciteit van de voorafgaande buis (4,5 pF), resp. ingangscapaciteit van de volgende buis (9,5 pF). Hierbij komt nog de capaciteit van de buishouder en van enige schakelelementen, waardoor men vindt: $C_1 = 7$ pF en $C_2 = 15$ pF. De verhouding $\beta = 7/15 = 0{,}47$ komt hier dus toevallig zeer gunstig uit.

Gaan we, met het oog op de toleranties, niet tot de uiterste waarde van x ($\approx 1{,}8$), doch tot 1,6, en stellen we de bovenste grensfrequentie op 30 Mper/sec, dan volgt hieruit voor R, met $C_p = 7 + 15 = 22$ pF, de waarde 400 ohm. Voor de bijbehorende waarde van L levert (3): $L = 2{,}5$ µH. De versterking per trap bedraagt $SR = 3{,}25$.

We komen nu tot de laatste trap waarop niet, als bij de vorige trappen, de ingang van een buis EF 42, maar de gelijkrichtschakeling is aangesloten, die een veel geringere capaciteit heeft: $C_2 = 3{,}5$ in plaats van 15 pF. Was deze trap op dezelfde wijze ingericht als de voorafgaande, dan zou nu $\beta = 2$ zijn (C_1 is weer 7 pF). Naar uit fig. 3 is te zien, zou dit oorzaak zijn van een hoge piek in de frequentiekarakteristiek. Men zou C_2, door het parallelschakelen van een kleine capaciteit, tot 15 pF kunnen vergroten en daarmee de toestand gelijk maken aan die in de vorige trappen. Beter echter kan men een andere weg volgen, waarmee een grotere versterking kan worden verkregen. De schakeling van de zesde trap wordt daartoe iets gewijzigd: de spoel L wordt hier vóór de weerstand R — nu R_1 genoemd — geplaatst (*fig. 4*, vgl. fig. 2). Zoals men gemakkelijk kan nagaan, gelden ook voor

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dit geval de formules (2), (3) en (4), mits men C_1 en C_2 verwisselt (dwz. in (2) moet men C_2 vervangen door C_1; C_p en C_s blijven onveranderd, en onder β moet men nu verstaan: C_2/C_1). We kunnen dus ook nu de krommen van fig. 3 gebruiken, in het bijzonder die met de gunstigste vorm ($\beta \approx 0{,}5$).

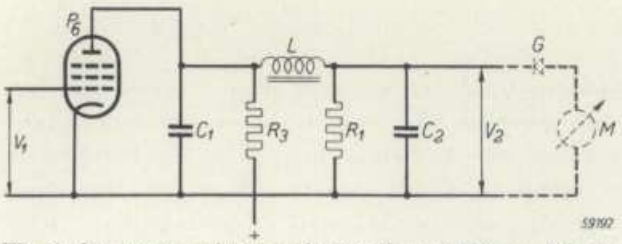


Fig. 4. Om een gunstige waarde van β te verkrijgen (fig. 3), is in het netwerk dat volgt op de laatste versterkbuis (P_6) de spoel L vóór de weerstand R (nu R_1 genoemd) geplaatst (vgl. fig. 2). R_3 = weerstand waarover de anode wordt gevoed. Gestippeld is de gelijkrichtketen aangeduid (detector G, draaispoelmeter M).

Nemen we weer 1,6 als hoogste waarde van x, dan volgt hieruit, met 30 Mper/sec als grensfrequentie en $C_p = 7 + 3{,}5 = 10{,}5$ pF: $R_1 = 800$ ohm. De versterking van de laatste trap,waarvan de buis EF 42 ook op een steilheid van ca 8 mA/V is ingesteld, bedraagt dan $SR_1 \approx 6{,}5$.

In tweeërlei opzicht behoeven de maatregelen om tot zo hoog mogelijke frequenties de versterking constant te houden, nog enige aanvulling.

1) De waarde der capaciteiten C_1 en C_2, van welker verhouding de vorm van de frequentiekarakteristiek sterk afhangt, heeft men niet zeer nauwkeurig in de hand, zodat in het algemeen de ene trap met een wat te grote, de andere met een wat te kleine waarde van β zal werken. Men zou hierin kunnen voorzien door het aanbrengen van zg. trimmers (kleine bijregelcondensatoren). In de practijk is bevonden dat men met één trimmer (over C_2 in de laatste trap) kan volstaan. Het is onvermijdelijk dat daardoor C_p wat groter wordt dan de bovengenoemde waarde van 10,5 pF. Om die reden is voor R_1 een kleinere waarde gekozen, nl. 510 ohm. De versterking van de zesde trap is dus $SR_1 = 4{,}2$; de totale versterking is derhalve $3{,}25^5 \cdot 4{,}2 = 1500$.

Het is wenselijk gebleken, ook de zelfinductie L van de laatste trap te kunnen instellen. Daarom is deze spoel voorzien van een verschuifbare kern van „Ferroxcube", een materiaal met grote permeabiliteit en geringe verliezen [1]).

2) Terloops wezen wij er al op dat een daling van de versterking per trap met 5% tot gevolg heeft dat de totale versterking (zes trappen) met meer dan 25% afneemt. Wij willen nu de indruk wegnemen dat hiermee genoegen zou zijn genomen. Om deze daling, die vooral in het frequentiegebied tussen 20 en 30 Mper/sec merkbaar zou worden, tegen te gaan, is in één van de anodekringen in serie met de weerstand R een spoel met de instelbare zelfinductie L_1 opgenomen. De versterking van deze trap wordt dan in eerste benadering gegeven door formule (4), als men in de teller R vervangt door $\sqrt{R^2 + \omega^2 L_1^2}$. Men kan L_1 zodanig kiezen dat bij stijgende frequentie de teller sneller groter wordt dan de noemer, zodat een oplopende frequentiekarakteristiek wordt verkregen. Hiermee kan, in een beperkt frequentiegebied, het afnemen van de versterking in de andere trappen worden gecompenseerd.

Om de volgende reden is deze maatregel slechts in één trap genomen. Plaatste men in ieder der zes trappen in serie met R een zelfinductie L_1 (die dan slechts een afneming in de versterking van ca 5% zou behoeven te compenseren), dan zou L_1 zo onpractisch klein moeten zijn dat de spoeltjes niet goed met de gewenste tolerantie zouden zijn te fabriceren.

Ook de spoel L_1 is voorzien van een verschuifbare kern van „Ferroxcube", waarmee de zelfinductie op de beste waarde kan worden ingesteld.

Het resultaat van dit alles ziet men in *fig. 5*, kromme I, die de uitslag van het instrument als functie van de frequentie aangeeft, bij een ingangsspanning van constante grootte. De kleine slingeringen, die de karakteristiek tussen 10 en 30 Mper/sec vertoont, zijn een gevolg van kleine verschillen in de waarde van β in de verschillende trappen. Dat bij lage frequenties de karakteristiek niet als die van fig. 3 horizontaal blijft lopen, wordt in de volgende paragraaf verklaard.

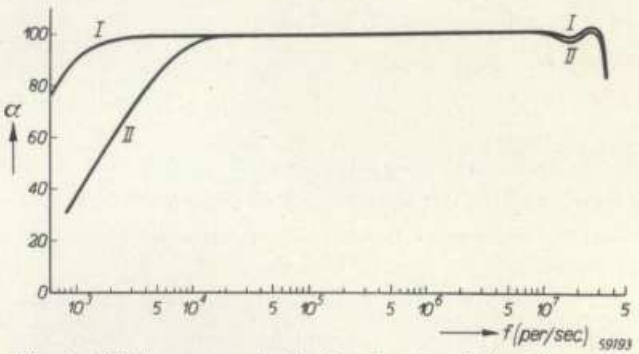


Fig. 5. Uitslag α van de draaispoelmeter als functie van de frequentie f van de constante sinusvormige ingangsspanning, I zonder verzwakker, II met verzwakker (in alle standen).

Onderste grens van het frequentiegebied

De schakelelementen die in wezen de vorm van de frequentiekarakteristiek bij lage frequenties bepa-

[1]) J. L. Snoek Niet-metallisch magnetisch materiaal voor hoge frequenties, Philips techn. T. 8, 353-360, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

len, zijn — naar zal blijken — de koppelcondensatoren C_3 en C_4 en de weerstanden R_2 en R_3 (zie *fig. 6*, die uit fig. 2*a* is verkregen door de schakelelementen weg te laten die voor de lage frequenties van geen betekenis zijn, zoals de capaciteiten C_1 en C_2 en de zelfinductie L).

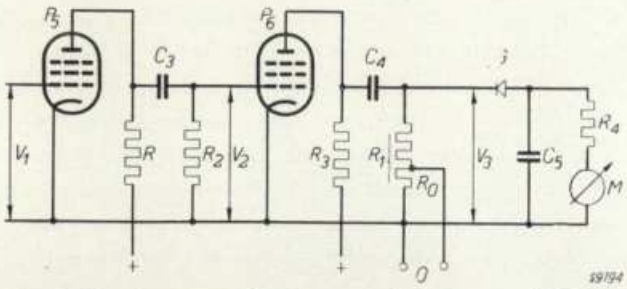


Fig. 6. Voorlaatste en laatste versterkertrap en gelijkrichtschakeling (weggelaten zijn de gelijkstroombronnen en de schakelelementen die alleen bij hoge frequenties van belang zijn). P_5 = vijfde, P_6 = zesde versterkbuis, C_3 en C_4 = koppelcondensatoren, C_5 = afvlakcondensator, G = kristaldetector, R en R_1 = anodekoppelweerstanden, R_2 = roosterweerstand, R_3 = anodevoedingsweerstand van P_6, R_4 = voorschakelweerstand van de draaispoelmeter M, R_0 = gedeelte van R_1 waarmee de klemmen O zijn verbonden. De relaxatietijden C_3R_2 en C_4R_3 bepalen de vorm van de frequentiekarakteristiek bij lage frequenties.

C_3 en R_2 — welke combinatie bij het stuurrooster van elk der zes buizen voorkomt — vormen een spanningsdeler, waardoor men voor de verhouding (in absolute waarde) van de spanningen V_2 en V_1 (fig. 6) vindt:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{RR_2}{R+R_2} \cdot S \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1+\left\{\frac{1}{\omega C_3(R+R_2)}\right\}^2}} \right] . \qquad (5)$$

Voor frequenties waarbij $\omega C_3 (R + R_2) \gg 1$, is de term tussen vierkante haken nagenoeg 1, doch voor lagere frequenties is hij < 1 en afhankelijk van de frequentie.

De onderste grensfrequentie, waarbij V_2/V_1 een nog toelaatbaar geacht bedrag kleiner is dan 1, kan men in principe zo laag leggen als men wil door C_3 en $R + R_2$ voldoend grote waarden te geven. Geen van beide echter kan men willekeurig groot kiezen. C_3 is beperkt, omdat een grotere capaciteit een condensator van grotere afmetingen vraagt, die een grotere capaciteit ten opzichte van de omgeving heeft; hier zou een te ver verlagen van de onderste grensfrequentie gepaard gaan met een verlagen van de bovenste grensfrequentie. En wat $R + R_2$ betreft, hiervan is de grootte begrensd door de maximaal toelaatbare waarde van de roosterweerstand R_2 (1 MΩ bij de buis EF 42); de weerstand R, die, naar wij hebben gezien, slechts 400 ohm bedraagt, legt hier geen gewicht in de schaal.

Een soortgelijke beschouwing geldt voor de laatste trap. Noemen wij de ingangsspanning van de laatste buis weer V_2, en de uitgangsspanning (over R_1, fig. 6) V_3, dan geldt, analoog aan formule (5):

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{R_1R_3}{R_1+R_3} \cdot S \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\left\{\frac{1}{\omega C_4(R_1+R_3)}\right\}^2}} ,$$

waarin R_1, R_3 en C_4 in de plaats van R, R_2 en C_3 zijn getreden. R_1 heeft de bovengenoemde waarde van ca 500 ohm en is dus van weinig betekenis in vergelijking met de weerstand R_3 waarover de anode van P_6 wordt gevoed, welke weerstand bijv. 10 000 ohm kan zijn, maar, met het oog op het gelijkspanningsverlies dat er in optreedt, ook niet veel meer.

In wezen wordt bij lage frequenties de afwijking van de nominale versterking dus bepaald door de relaxatietijden C_3R_2 en C_4R_3. Met

C_3 in de orde van grootte van 1000 pF,
C_4 in de orde van grootte van 0,1 μF,
R_2 in de orde van grootte van 1 MΩ en
R_3 in de orde van grootte van 10 000 Ω

heeft het apparaat de in fig. 5, kromme I, afgebeelde karakteristiek, die bij 1000 per/sec nog slechts enkele % van de nominale hoogte afwijkt.

Stabilisatie van de versterking

De totale versterking is evenredig met het gedurige product der steilheden van de zes versterkbuizen. Zonder speciale maatregelen zou de versterking dus in hoge mate afhangen van factoren die op de steilheid invloed hebben, met name de grootte der voedingsspanningen en het emitterend vermogen van de kathoden.

Om een ongeveer constante versterking te verkrijgen, zijn wij uitgegaan van het feit dat de steilheid van een buis in sterke mate gecorreleerd is met de waarde van de kathodegelijkstroom, zodat het er wat de steilheid betreft, in eerste benadering niet toe doet of een bepaalde kathodegelijkstroom is verkregen met een sterk negatieve stuurroosterspanning en een grote schermroosterspanning, of met een zwak negatieve stuurroosterspanning en een kleine schermroosterspanning. Het komt er dus op aan, de kathodegelijkstroom constant te houden. Te dien einde is een sterke gelijkstroom-tegenkoppeling aangebracht (24-voudig per trap) door middel van kathodeweerstanden van ongebruikelijk grote waarde (2700 ohm; normaal gebruikt men bij de EF 42 weerstanden van 160 ohm). De kathodeweerstanden zijn ieder overbrugd door een grote capa-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

citeit, zodat de tegenkoppeling voor wisselspanningen met frequenties groter dan 1000 per/sec niet werkzaam is, en de wisselspanningsversterking in het meetgebied er dus niet door wordt verkleind.

Daar het spanningsverlies in deze kathodeweerstanden veel groter is dan de vereiste voorspanning in de stuurroosterkringen, is in deze kringen tevens een positieve gelijkspanning opgenomen van zodanige grootte dat de juiste voorspanning wordt verkregen. Deze positieve gelijkspanning wordt via een potentiometer ontleend aan het voedingsapparaat en constant gehouden door een stabiliseerbuis (type 85 A1).

Het resultaat van deze maatregelen is, dat de kathodestroom der buizen EF 42, en daardoor ook de steilheid, slechts weinig veranderen bij fluctuatie van de voedingsspanning of bij het ouder worden of uitwisselen van de buizen. Bij 5% netspanningsvariatie verandert de totale versterking 5% (in tegengestelde zin). Deze resterende inconstantheid van de versterking is een gevolg hiervan dat het uitgangspunt van onze redenering, zoals gezegd, slechts bij benadering juist is: de steilheid hangt wel in hoofdzaak, doch niet uitsluitend af van de kathodestroom.

Met de zoëven genoemde potentiometer, die verstelbaar is door middel van een in een der zijwanden van de kast verzonken schroefje, regelt men bij de ijking (zie later) de voorspanning in alle zes roosterkringen gelijktijdig. Wordt bijv. één buis vervangen door een andere die een 5% grotere steilheid heeft, dan wordt de daarmee overeenkomende toeneming der versterking gecompenseerd door de steilheid van de vijf andere buizen 1% te verminderen; hiervoor is slechts een geringe wijziging van de voorspanning nodig.

Ruisen

Bij het ontwerpen van een versterker met een zo brede frequentieband als de onderhavige mag een beschouwing over het ruisen niet ontbreken.

In de versterker komen twee soorten van schakelelementen voor die een bron van geruis vormen: weerstanden en buizen. Beschouwen we eerst de buizen.

Voor de effectieve waarde V van de ruisspanning aan de ingang van een buis, in een frequentieinterval Δf, geldt [2]):

$$V = \sqrt{4\,k\,T\,R_{aeq} \cdot \Delta f},$$

waarin k de constante van Boltzmann is, $= 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/°K, T de temperatuur in °K en R_{aeq} de bij kamertemperatuur aequivalente ruisweerstand van de buis. Voor de buis EF 42 is $R_{aeq} = 750$ ohm. Daarmee vindt men, met $\Delta f = 30 \cdot 10^6$ per/sec, $V = 19$ μV. Het ruisen van de buis in de eerste trap kan men dus in rekening brengen met een ruisspanning van 19 μV aan de ingang van de eerste trap; evenzo het ruisen van de tweede trap met een even grote ruisspanning aan de ingang van deze tweede trap. Dit laatste is, bij een drievoudige versterking per trap, gelijkwaardig met $19/3 = 6{,}3$ μV aan de ingang van de eerste trap. Het ruisen van deze beide buizen tezamen beantwoordt dus aan een ruisspanning van $\sqrt{19^2 + 6{,}3^2} = 20$ μV aan de ingang van de eerste trap. De ruisbijdrage van de derde en verdere buizen is zo klein dat men ze gevoegelijk kan verwaarlozen.

Op analoge wijze geldt voor het ruisen van de weerstanden die in de versterker voorkomen, dat men in eerste instantie slechts behoeft te letten op de weerstand aan de ingang van de versterker. Deze weerstand (de roosterweerstand van de eerste buis) bedraagt 1 MΩ, wat op zichzelf een aanzienlijke ruisspanning zou leveren, ware het niet dat de ingangscapaciteit van de versterker (ca 20 pF) aan de weerstand is parallelgeschakeld. Deze capaciteit vormt met de weerstand een spanningsdeler, die vooral de ruisspanningscomponenten met hoge frequenties verzwakt. Daaraan is het te danken dat de resterende, van deze weerstand afkomstige ruisspanning gering is, vergeleken met de spanning van 20 μV waarvoor de buizen aansprakelijk zijn. De ruisspanning van 20 μV veroorzaakt op de meter een uitslag die slechts 2% vormt van de volle uitslag (1 mV); dit is zo weinig dat de eerstgenoemde uitslag gemakkelijk kan worden gecompenseerd door een zwakke, tegenwerkende gelijkstroom door de draaispoelmeter te sturen. Deze stroom wordt betrokken van het voedingsapparaat.

Gebruik van de versterker voor andere doeleinden

Daar een versterker met een karakteristiek als die van fig. 5 (*I*) voor velerlei doeleinden goed van pas kan komen, is de versterker van de meter GM 6006 voorzien van uitgangsklemmen (*O*, fig. 6), waaraan een gedeelte van de uitgangsspanning kan worden afgenomen. Bij 1 mV ingangsspanning bedraagt aan *O* de spanning 0,5 V. De weerstand R_0 tussen de klemmen *O* is laag (180 ohm), zodat men op *O* vrij lage impedanties kan aansluiten zonder dat de spanning merkbaar daalt. De meter blijft hierbij de grootte van de ingangsspanning aanwijzen.

[2]) Zie bijv. M. Ziegler, De bijdrage van de versterkerbuizen tot het ruisen van versterkers, Philips techn. T. **2**, 329-334, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De gelijkrichtschakeling

Keuze van het ventiel

Zoals reeds gezegd, wordt de uitgangsspanning van de versterker gelijkgericht, en de verkregen gelijkspanning aan een draaispoelmeter toegevoerd (fig. 6). Hierbij wordt een afvlakcondensator (C_5) gebruikt, zodat men feitelijk de topwaarde van de wisselspanning meet. De schaal is echter geijkt in de effectieve waarde van een sinusvormige spanning. Ook als de aangelegde spanning niet sinusvormig is, geldt, dat de topwaarde van deze spanning $\sqrt{2}$ maal zo groot is als de afgelezen waarde.

Als ventiel kan men een diode of wel een kristaldetector (bijv. met germaniumkristal) gebruiken. Om de volgende reden hebben wij de laatste gekozen.

Door een keten waarin een diode voorkomt, vloeit, ook zonder dat er een spanningsbron aanwezig is, al enige stroom. De grootte van deze nulstroom is sterk afhankelijk van de kathodetemperatuur (dus van de netspanning). Compenseren van de nulstroom is daardoor niet goed mogelijk zonder dat herhaaldelijk bijregelen nodig is. Slechts indien in de diodeketen een vrij grote spanning aanwezig is (ten minste 3 tot 4 V voor volle uitslag), heeft men van de nulstroom weinig last. Bij een kristaldetector daarentegen treedt geen nulstroom op. Niettemin is het ook hier wenselijk met niet al te geringe spanning te werken, met het oog op de reproduceerbaarheid van de karakteristiek bij kleine spanningen. Men kan hier echter volstaan met 1,5 V voor volle uitslag. Bij dezelfde gevoeligheid kan hier de versterking dus 2 tot 3 maal zo klein zijn als in het geval van een diode.

Overbelastbaarheid

Bij een ingangsspanning van 1 mV op de versterker loopt er een stroom van 100 μA door de draaispoelmeter. Voert men de ingangsspanning op, dan treedt al spoedig een toestand van overbelasting op, waarin de uitgangsspanning minder dan evenredig met de ingangsspanning toeneemt en ten slotte tot een constante eindwaarde nadert. De gelijkrichterstroom groeit daarbij aan tot ca 400 μA, een waarde waartegen zowel de meter als het kristal goed bestand zijn (dit in tegenstelling met bijv. een thermokoppel, dat overigens ook een bruikbaar instrument is om de uitgangswisselstroom van de versterker om te zetten in een gelijkstroom, maar waarvan de geringe overbelastbaarheid practisch een groot nadeel is). Het is dus uitgesloten het instrument door overbelasting te beschadigen, tenzij men het rechtstreeks, zonder verzwakker op een spanning van vele honderden volt zou aansluiten, waarbij de ingangsweerstand te warm wordt of de ingangsroostercondensator doorslaat; dit is echter pas het geval bij een meer dan honderdduizendvoudige overbelasting!

Inwendige ijking

In de stand „Contr." van de omschakelaar (fig. 1) komt op de ingang van de versterker een wisselspanning van 1 mV te staan, zodat de meter dan de volle uitslag moet geven. Eventuele afwijking hiervan kan worden gecorrigeerd door middel van de reeds besproken regeling van de voorspanning der versterkbuizen.

De ijkspanning van 1 mV wordt verkregen door de versterker aan het oscilleren te brengen. Daartoe is op de uitgang een trillingskring aangesloten van welks spanning een nauwkeurig vastgelegde fractie met de juiste faze naar de ingang van de versterker wordt teruggevoerd (*fig. 7*). Bij het inschakelen

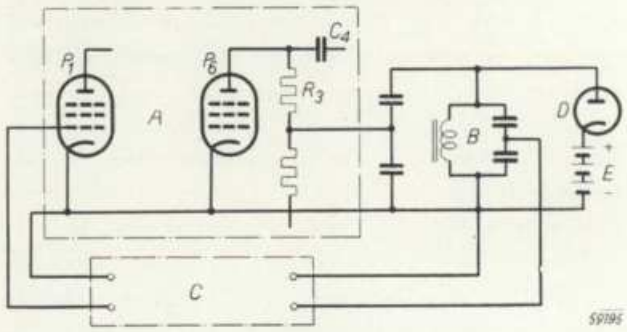


Fig. 7. IJkschakeling. Een gedeelte van de spanning over de trillingskring B aan de uitgang van de versterker A wordt over een netwerk C teruggevoerd naar de ingang van A. Door deze terugkoppeling gaat de schakeling oscilleren. De amplitude van de spanning over B wordt, door tussenkomst van de diode D, begrensd tot de constante waarde E, die zodanig is gekozen dat de ingangsspanning van A juist 1 mV is. R_3 en C_4 als in fig. 6.

ontstaat aan de trillingskring een groter wordende wisselspanning, die in haar aangroeien wordt gestuit doordat parallel met de kring een diode in serie met een gelijkspanningsbron (drempelspanning) is aangesloten. Zolang de top van de wisselspanning kleiner is dan de drempelspanning, heeft de paralleltak geen invloed, doch zodra de top de drempelspanning overschrijdt, vormt hij een grote demping op de trillingskring. Het resultaat is dat de spanningsamplitude van de kring wordt begrensd tot (nagenoeg) de drempelspanning. Deze laatste (ongeveer 7 V) wordt door spanningsdeling verkregen uit de constante spanning van de meergenoemde stabiliseerbuis (85 A1).

Het oscilleren geschiedt met een frequentie van ongeveer 5000 per/sec, dus in een gebied waarin de versterking niet van de frequentie afhangt (zie fig. 5).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De trillingskring heeft een hoge kwaliteitsfactor (impedantie 3 MΩ); de spoel is voorzien van een kern van „Ferroxcube".

De verzwakker

Voor het meten van spanningen groter dan 1 mV wordt gebruik gemaakt van een vóór de versterker geschakelde verzwakker, waarvan de impedantie tezamen met de ingangsimpedantie van de versterker een spanningsdeler vormt. Voor frequenties hoger dan ca 25 000 per/sec is de laatstgenoemde impedantie bijna zuiver capacitief. Door als verzwakker een condensator te nemen, krijgt men dus een verzwakking die in dit gebied nagenoeg onafhankelijk is van de frequentie. Beneden 25 000 per/sec echter neemt de ingangsimpedantie van de versterker, naarmate de frequentie lager wordt, meer en meer het karakter van een weerstand aan, zodat daar de verzwakking wel van de frequentie afhangt (zie kromme *II*, fig. 5).

De verzwakker van de voltmeter GM 6006 (*fig. 8*) bestaat uit een in twaalf stappen regelbare condensator, waarmee de volgende gevoeligheden worden verkregen: volle uitslag bij resp. 1 mV; 10 mV; 31,6 mV; 0,1 V; 0,316 V; 1V; 3,16 V; 10 V; 31,6 V; 100 V; 316 V; 1 kV. De grootte van de stappen bedraagt dus een factor $\sqrt{10}$, behalve bij de eerste stap, die een factor 10 groot is. De verzwakker is uitgevoerd als schuifcondensator en ondergebracht in een „meetkop", die door een kabel met de versterker is verbonden.

De vaste electrode van de schuifcondensator is verbonden met een uitwendige contactpen, de verschuifbare electrode met de ader van de kabel. In elk der twaalf standen wordt de verschuifbare electrode gefixeerd door een arrêteerinrichting. Op een schaalverdeling, die met deze electrode meebeweegt, is de stand afleesbaar (fig. 8; het getal 31,6 is hier tot 30 afgerond, 0,316 tot 0,30, enz.).

Er is naar gestreefd de condensator zo te construeren dat de opeenvolgende standen, die in gevoeligheid telkens een factor $\sqrt{10}$ verschillen [3]), worden verkregen door verschuivingen die onderling even groot zijn, daar dan de invloed van een gegeven onnauwkeurigheid in elke arrêtering constant is. De capaciteit tussen de electroden moet daartoe een exponentiële functie zijn van de afstand tussen deze electroden. Op de volgende wijze is dit bereikt.

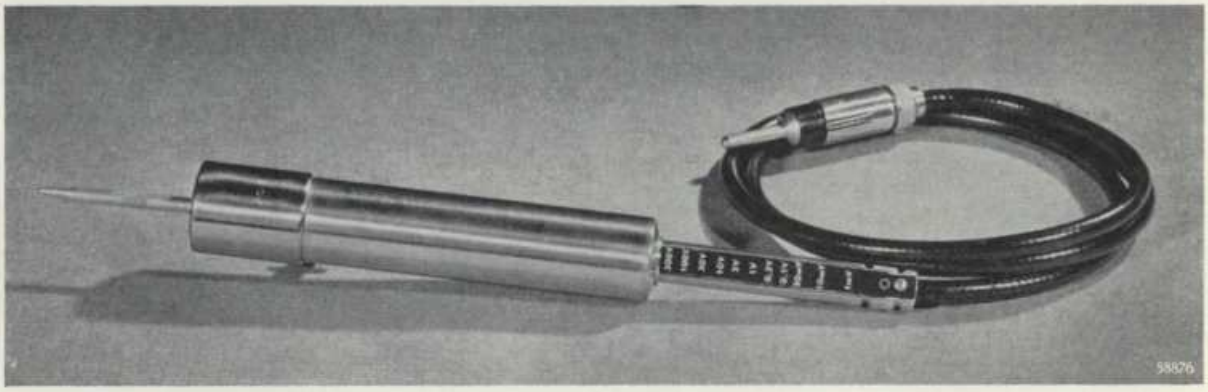


Fig. 8. Capacitieve verzwakker met kabel. De steel van de verzwakker kan worden in- of uitgeschoven ter verandering van de gevoeligheid. De grootste gevoeligheid komt overeen met 1 mV, de kleinste met 1 kV voor volle uitslag. In ieder van de twaalf standen is de steel gearrêteerd.

Bevinden zich twee plaatvormige electroden in een geaarde pijp (*fig. 9*) en is de afstand l tussen de electroden minstens enige malen zo groot als de diameter D van de pijp, dan neemt de capaciteit tussen de electroden bij toenemende l met grote benadering exponentieel af.

De in fig. 9 afgebeelde configuratie kan men opvatten als een golfpijp. Golven die langer zijn dan een bepaalde critische golflengte, kunnen zich in een golfpijp niet voortplanten [4]); de amplitude van zulke golven neemt exponentieel af met de diepte waarover de golf in de pijp is doorgedrongen [5]).

Om de capaciteit met een factor 10 te veranderen, is dan een axiale verplaatsing van $0{,}48\,D$ nodig. Komen de electroden echter zo dicht bij elkaar dat $l \approx D$, of $< D$, dan hangt de capaciteit mede sterk af van de vorm der electroden.

In onze verzwakker is voor kleine gevoeligheid (te meten spanning tussen 1 kV en ca 1 V) de elec-

[3]) De stand voor 1 mV, waarbij de electroden zijn kortgesloten, blijft hier buiten beschouwing.

[4]) Zie bijv. W. Opechowski, Electromagnetische golven in golfpijpen, II, Philips techn. T. **10**, 46-54, 1948 (no. 2), in het bijzonder blz. 52.

[5]) Een mechanisch model waarmee dit voor rechthoekige golfpijpen kan worden aangetoond, werd onlangs beschreven door K. S. Knol en G. Diemer, Een model voor het bestuderen van electromagnetische golven in rechthoekige golfpijpen, Philips techn. T. **11**, 156-163, 1949 (no. 5), fig 4 en 5.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

trodenafstand zo groot dat de exponentiële wet geldt. Om deze wet met goede benadering ook voor grote gevoeligheid te laten doorgaan, is een bijzondere vorm van electroden gekozen: de verplaatsbare electrode is buisvormig en schuift, in de standen voor grote gevoeligheid, concentrisch om de vaststaande, staafvormige electrode heen. Om het juiste capaciteitsverloop te benaderen, is de vaste electrode omgeven door een keramisch cylindertje en voorzien van een dun gedeelte (zie *fig. 10*, die de verzwakker in doorsnede weergeeft); het exponentiële verloop bij kleine gevoeligheid (grote afstand tussen de electroden) wordt hierdoor niet aangetast.

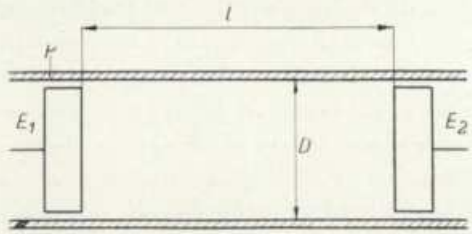


Fig. 9. De capaciteit tussen twee electroden (E_1, E_2) in een geaarde pijp P is met goede benadering een exponentiële functie van de afstand l, mits l minstens enige malen zo groot is als D.

Naar fig. 8 laat zien, is op deze wijze inderdaad bereikt dat de schaalverdeling volgens stappen van $\sqrt{10}$ in de gevoeligheid nagenoeg lineair is.

In de stand voor de grootste gevoeligheid (1 mV) zorgt een contactveer er voor dat de electroden worden kortgesloten. (Bij het meten met deze gevoeligheid kan men echter beter rechtstreeks aansluiten op de klemmen van de versterker, waardoor de capaciteit van de kabel wordt vermeden). In de andere standen bedraagt de ingangscapaciteit van de verzwakker, ten opzichte van aarde, slechts 2,8 pF.

Reeds bij een geringe verplaatsing van de vaste electrode ten opzichte van de verschuifbare zou de juiste ijking verloren gaan. Om te voorkomen dat stoten tegen de contactpen deze electrode zou ontzetten, is de electrische verbinding tussen deze beide tot stand gebracht door een slap veertje (fig. 10).

In de kabel die de verzwakker met de versterker verbindt en die 0,85 m lang is, zou, door de aanwezigheid van zelfinductie en capaciteit, bij de hoogste frequenties een zekere opslingering van de spanning ontstaan — waardoor de spanning aan het eind van de kabel hoger zou zijn dan die aan het begin —, als aan de ingang van de versterker niet een geschikt gekozen dempweerstand was aangebracht die dit effect teniet doet.

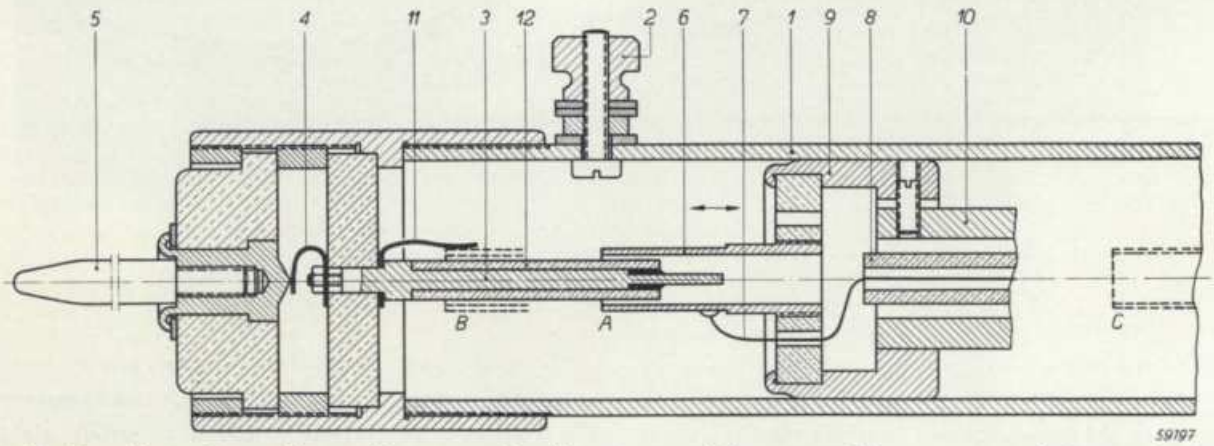


Fig. 10. Langsdoorsnede van de capacitieve verzwakker (iets vereenvoudigd; ongeveer 1,6 × ware grootte). *1* = metalen buis, die door middel van de schroef *2* moet worden geaard. *3* = vaste electrode, over de bladveer *4* verbonden met de contactpen *5*. *6* = buisvormige verschuifbare electrode, verbonden met de ader *7* van de kabel *8*. *6* is geïsoleerd bevestigd aan de zuiger *9*, die in de buis *1* glijdt. De zuiger is bevestigd aan een buiten de pijp *1* uitstekende steel *10*, die de schaalverdeling draagt (zie fig. 8) en waarop de (niet getekende) arrêteerinrichting werkt (stalen kogeltje dat verend in een gaatje wordt gedrukt). De getekende stand *A* van de verschuifbare electrode is die voor 30 mV. Bij *B* is gestippeld de ene uiterste stand (1 mV) aangegeven; in deze stand sluit de veer *11* de verzwakker kort. In de bij *C* aangegeven stand is de afstand tussen de electroden zo groot dat de exponentiële wet opgaat. Om dit ook bij een stand als *A* nog ongeveer het geval te doen zijn, is het keramische buisje *12* aangebracht en heeft de vaste electrode een dun en een dik gedeelte.

Samenvatting. Beschreven wordt een millivoltmeter voor een groot frequentiegebied (10^3 - $30 \cdot 10^6$ per/sec), die bij 1 mV ingangsspanning de volle uitslag geeft en met behulp van een verzwakker geschikt is voor het meten van spanningen van 1 mV tot 1000 V. Het apparaat bevat een versterker met zes buizen EF 42, die 1500 × versterkt en waarop, via een kristaldetector, een draaispoelmeter is aangesloten. In de versterker zijn bijzondere maatregelen genomen om een versterking te krijgen die zo min mogelijk afhankelijk is van de frequentie, van de schommelingen in de netspanning en van de ouderdom der buizen. Voor het ijken wordt de versterker aan het oscilleren gebracht. Daarbij treedt aan de ingang een wisselspanning van 1 mV op (vastgelegd door een constante drempelspanning), zodat de meter dan de volle uitslag behoort te geven; een eventuele afwijking wordt gecorrigeerd door bijregelen van de voorspanning der stuurroosters. Het instrument is bestand tegen grote overbelasting. De verzwakker is over een kabel met de versterker verbonden en bestaat uit een schuifcondensator van bijzondere constructie, met twaalf geijkte standen. Hij is zo geconstrueerd dat bij eenzelfde verschuiving de gevoeligheid telkens met eenzelfde factor verandert. De versterker kan voor andere doeleinden tevens dienst doen voor het 500 × versterken van een wisselspanning die kleiner is dan 1 mV.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

SPECTROCHEMISCHE ANALYSE MET EEN GEIGERTELBUIS

door O. G. KOPPIUS *).

621.385.842:545.82

Geigertelbuizen waarvan het metaal der kathode foto-electronen uitzendt, kunnen dienen voor de meting van een zeer zwakke zichtbare of ultraviolette straling. Aangezien met behulp van de telbuis een directe aanwijzing van de stralingsintensiteit mogelijk is, heeft men hier een voortreffelijk hulpmiddel voor het ontdekken van sporen van chemische elementen door middel van de karakteristieke spectraallijnen die zij uitzenden. Op deze grondslag is een eenvoudig toestel uitgewerkt dat reeds verscheidene jaren met succes wordt gebruikt voor het aantonen van lood in de atmosfeer van fabrieksruimten.

Het aantonen van sporen van een element door middel van de karakteristieke spectraallijnen die het in een electrische vonk- of boogontlading uitzendt, is reeds tamelijk oud. Het eerst werd dit principe toegepast door Kirchhoff en Bunsen bij de ontdekking en zuivere bereiding van caesium en rubidium; Gerlach ontwikkelde de methode van de zg. „inwendige standaard", waardoor het principe voor een nauwkeurige kwantitatieve analyse bruikbaar werd. In het laatste decennium heeft het verscheidene toepassingen in de industrie gevonden, bijv. voor routine-analysen van ijzer eu staal wat betreft hun gehalte aan calcium, silicinm, mangaan, chroom, magnesium en andere elementen. Met moderne hulpmiddelen zijn zulke spectrochemische analysen zeer snel en met grote nauwkeurigheid uit te voeren [1]).

De toepassing der spectrochemische analysemethode die in dit artikel zal worden beschreven, heeft betrekking op het aantonen van lood in de lucht. In verschillende takken der chemische industrie kan het, ten gevolge van kleine lekken in installaties, voorkomen dat de atmosfeer in een fabriek met lood bezwangerd raakt. Met het oog op de bekende giftige werking van lood, heeft men in verscheidene landen grenzen voor het toe te laten loodgehalte in de lucht vastgesteld. Om te controleren of het loodgehalte in een fabriek de veilige grens niet overschrijdt, is een methode ter snelle analyse van luchtmonsters op hun loodgehalte gewenst.

Toen dit probleem zich in een der fabrieken van de I.E. du Pont de Nemours & Co. voordeed, bestond er geen twijfel, dat de zeer gevoelige en zeer specifiek werkende spectrochemische analysemethode de beste vooruitzichten bood om aan de nogal hoge eisen te voldoen. Er werd allereerst een fotografische werkwijze ontwikkeld [2]). In de fabriek waarin de zuiverheid van de lucht moest worden gecontroleerd, werd continu een vonkontlading tussen twee koperen electroden onderhouden. Het spectrum van de vonk werd met behulp van een kleine kwartsspectrograaf fotografisch opgenomen. Een deel van dit spectrum, dat voornamelijk uit koperlijnen bestaat, met nog een aantal andere lijnen, die o.a. aan de waterdamp in de lucht kunnen worden toegeschreven, is in *fig. 1a* weergegeven.

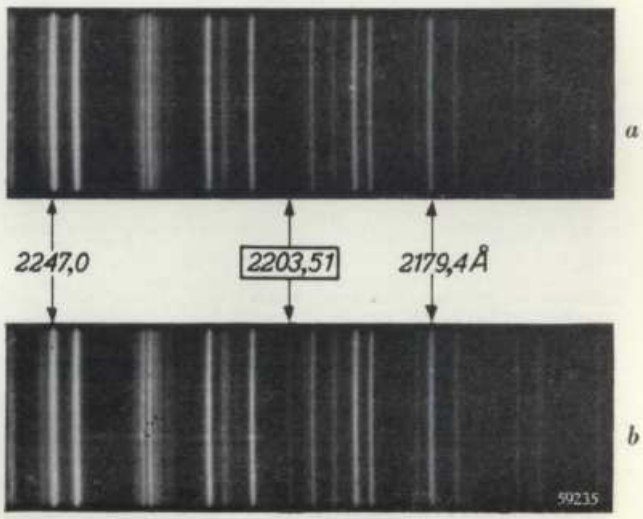


Fig. 1. *a*) Spectrum van de vonkontlading zonder lood. De meeste lijnen zijn afkomstig van het koper der electroden, enkele van de waterdamp in de lucht.
b) Spectrum van de vonk in lucht die met lood is verontreinigd; men ziet de loodlijn bij 2203 Å.

Bevat de lucht sporen van een loodverbinding, dan wordt deze in de hete vonk ontleed, en in het spectrum verschijnen loodlijnen. De gevoeligste lijn, d.i. de lijn die bij de kleinste loodconcentraties optreedt, is gelegen bij 2203 Å, dus ver in het ultraviolet. Een foto van het spectrum van de kopervonk met deze loodlijn ziet men in fig. 1*b*.

*) Philips Laboratories, Inc., Irvington-on-Hudson, N.Y., U.S.A.

[1]) Zie bijv.: R. Sawyer, Experimental Spectroscopy, Prentice Hall, New York 1944.

[2]) H. Aughey, J. Opt. Soc. Amer. **39**, 292-293, 1949 (No. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Door na te gaan of deze lijn op de fotografische plaat aanwezig is, kan men lood aantonen in een concentratie van 1 op 50 millioen gewichtsdelen. Dit is nog ongeveer 7 maal minder dan aan de maximaal toelaatbare loodconcentratie (0,15 mg lood per m^3 lucht) beantwoordt. De vereiste belichtingstijd bedroeg ongeveer 1 minuut. Door de intensiteit der loodlijn op het oog te vergelijken met die der naburige koperlijnen, kon het loodgehalte ook kwantitatief bij benadering worden bepaald. Een ijking werd uitgevoerd door de uitkomsten van zulke bepalingen te vergelijken met die van chemische analysen verricht op gelijktijdig uit dezelfde luchtstroom genomen luchtmonsters.

Hoewel de fotografische methode zeer bevredigend werkte en de superioriteit der spectrochemische analyse boven vroeger toegepaste chemische methoden er treffend door werd gedemonstreerd, gaat zij toch mank aan een gebrek, dat zich in de practijk zeer onaangenaam doet gevoelen: de methode werkt essentieel discontinu. In een fabrieksbedrijf is het gewenst veiligheidsmaatregelen niet te baseren op de ontdekking dat ergens een ontoelaatbaar hoog loodgehalte aanwezig is, doch veeleer op de vroegtijdige ontdekking van een toeneming van de loodconcentratie met de tijd, waardoor een lek in de fabrieksinstallaties aan het licht komt lang voordat gevaarlijk hoge loodconcentraties in de atmosfeer zijn bereikt. Het aantonen van zulk een toenemende tendentie in het loodgehalte en het opsporen van het lek vereisten bij de fotografische methode het achtereenvolgens opnemen en vergelijken van een reeks spectrogrammen. In het algemeen waren er aldus een tot drie uren mee gemoeid, alvorens voldoende gegevens ter beschikking stonden.

Een belangrijke verbetering kon op dit punt worden bereikt, door de fotografische plaat, waarmee de energie der spectraallijn bij 2203 Å wordt gedetecteerd, te vervangen door een foto-electrische Geigertelbuis [3]). Het is inderdaad mogelijk deze lijn, indien zij door een spectrograaf geïsoleerd is, met een stralingsdetector als de Geigertelbuis aan te tonen. De informatie omtrent andere spectraallijnen, die de spectrograaf tevens levert, kan men voor dit geval gerust missen (als we even afzien van het instellen en ijken). Het grote voordeel van de Geigertelbuis, mits voorzien van een inrichting waarmee men het aantal per tijdseenheid binnenkomende stralingsquanta rechtstreeks meet, bestaat hierin dat men nu een continu werkend en direct aanwijzend meetinstrument heeft. Zulk een meetinstrument is voor het ontdekken van lekken veel beter geschikt dan een discontinu werkende inrichting, aangezien het een neiging tot verandering van het loodgehalte onmiddellijk verraadt. Zo heeft men, als men de te onderzoeken lucht door een slang naar de vonk zuigt en de pijpen, kranen enz. van een installatie met de opening van de slang aftast, een zeer doelmatige methode voor het opsporen van lekken verkregen.

Door later te verklaren oorzaken bereikt men met de Geigertelbuis in het onderhavige geval niet zulk een grote gevoeligheid en nauwkeurigheid als met de fotografische methode. Doch men kan voor het meer beperkte doel dat we zojuist hebben omschreven, te weten het localiseren van plaatsen met hoge loodgehalten bij eventuele lekken in fabrieks-

[3]) Het gebruik van Geigertelbuizen voor de spectrochemische analyse is ingevoerd door O. S. Duffendack en W. E. Morris, J. Opt. Soc. Amer. **32**, 8-24, 1942.

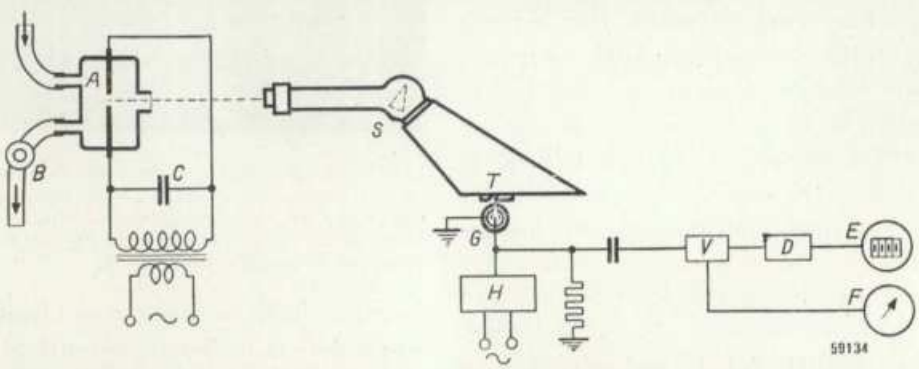


Fig 2. Opstelling voor het aantonen van lood in de lucht. *A* vonk tussen koperen electroden, *C* condensator voor het versterken van de vonkontlading. De ventilator *B* zuigt de lucht die eventueel lood bevat door de vonk heen. *S* spectrograaf die de straling van de vonk ontleedt, met verschuifbare uitgangsspleet *T* waardoor de loodlijn met golflengte 2203 Å geïsoleerd wordt. *G* Geigertelbuis, *H* hoogspanningsvoedingsapparaat. De ontladingsstoten in de telbuis worden versterkt in *V* en door middel van de deelschakeling *D* (met drie halveringstrappen) en het mechanische telwerk *E* geteld. De uitslag van de mA-meter *F* is evenredig met het aantal ontladingen per tijdseenheid.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

installaties, met geringere prestaties van de meetinrichting genoegen nemen. Aan de voor dit geval te stellen eisen bleek de methode met de Geigertelbuis ten volle te voldoen.

Het apparaat, dat voor de firma E. I. du Pont de Nemours & Co. werd gebouwd door het Philipslaboratorium te Irvington, U.S.A., willen wij hier nader beschrijven [4]).

Fig. 2 en *3* tonen de volledige opstelling. In het brandvlak van de kwartsspectrograaf, die de straling van de vonk ontleedt, is een spleet aangebracht, die over het spectrum kan worden verschoven. Plaats en wijdte van de spleet worden zo

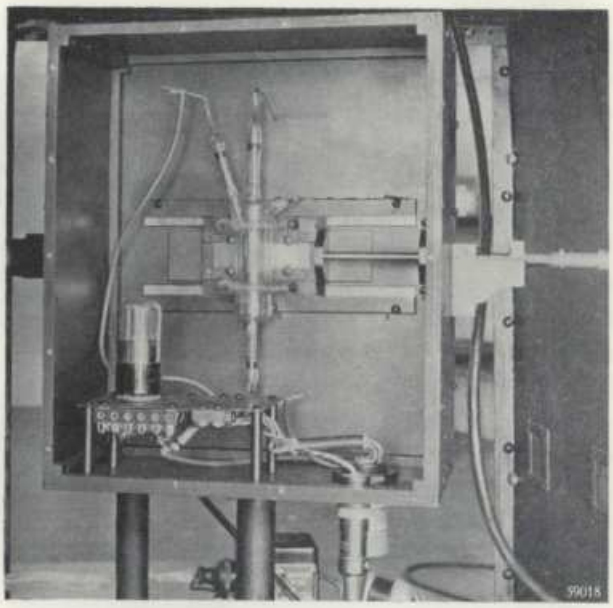


Fig. 3. Uitgangsspleet met Geigertelbuis en voorversterker aan de achterzijde van de spectrograaf. Met de micrometerschroef rechts kan de positie van de spleet in het spectrum worden gevarieerd.

afgesteld dat hij alleen de loodlijn bij 2203 Å doorlaat. Achter de spleet wordt de telbuis geplaatst. Tussen de draadvormige anode in de as van deze buis en de omgevende cylindrische kathode wordt een spanning van ongeveer 1500 V aangelegd. De ultraviolette straling treedt door een rechthoekige opening in de kathode binnen; vgl. *fig. 4*. De fotoelectronen die de straling op de tegenovergelegen binnenwand uit het metaal der kathode vrijmaakt, veroorzaken ieder een korte ontladingsstoot in de buis. Deze stoten worden versterkt en aan een mechanisch telwerk toegevoerd, of aan een schakeling waarin het aantal per tijdseenheid in de telbuis arriverende quanta rechtstreeks door een gemiddelde stroom wordt gemeten. De hiertoe gebezigde schakelingen zijn analoog aan die in het röntgendiffractie-apparaat met Geigerteller, dat indertijd in dit tijdschrift werd beschreven [5]).

De uitslag van de genoemde stroommeter geeft een directe contrôle op de loodconcentratie ter plaatse waar de lucht naar de vonk wordt afgezogen. Desgewenst kan men het apparaat deze concentratie continu laten registreren, of men kan het een alarmsignaal in werking laten stellen zodra het loodgehalte een bepaalde grens overschrijdt. Het gehele toestel, daarbij inbegrepen de voedingsapparatuur, is gemonteerd op wielen, zodat men er gemakkelijk elk gedeelte van het fabrieksterrein mee kan bereiken. De spectrograaf en de telbuis met een voorversterker zijn in een luchtdichte kast ondergebracht, die met een inert gas kan worden gevuld voor het geval de lucht in het te controleren gebouw een licht ontbrandbare damp bevat. De vonkbaan bevindt zich in een kanaal dat dwars door de luchtdichte kast loopt. Een kleine ventilator, aangedreven door een motor met explosiebeveiliging, drijft de lucht door het kanaal. Mocht de vonk een ontploffing in de lucht veroorzaken, dan dringt deze niet naar buiten door dank zij een fijnmazig draadnet dat voor de ingang en de uitgang van het kanaal is aangebracht.

Aangezien de Geigertelbuis in deze toepassingen moet dienen voor het tellen van foto-electronen, is zij enigszins anders geconstrueerd dan de meer gebruikelijke telbuizen, die op van buiten komende electronen of op gamma- of röntgenstralen moeten reageren. Bij toepassingen op röntgengebied bijv. is het zaak dat de in de telbuis komende röntgenstralen worden geabsorbeerd in het gas tussen de electroden, waarbij de geabsorbeerde röntgenquanta electronen vrijmaken (zie het in [5]) aangehaalde artikel); de keuze van het electrodenmetaal doet er in dit geval niet veel toe. In een telbuis voor foto-electronen daarentegen moet de gas-

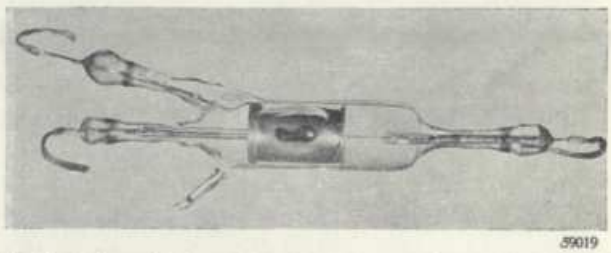


Fig. 4. Geigertelbuis van kwartsglas, voor het aantonen van ultraviolette straling met golflengte 2203 Å.

[4]) Een korte beschrijving is reeds elders gepubliceerd: O. G. Koppius, J. Opt. Soc. Amer. **39**, 294-297, 1949 (No. 4). De schrijver wil gaarne de heer H. Aughey van de E.I. du Pont de Nemours & Co. zijn erkentelijkheid betuigen voor de waardevolle hulp bij het ontwerp van het toestel.

[5]) J. Bleeksma, G. Kloos en H. J. Di Giovanni, Een röntgendiffractie-apparaat met Geigerteller, Philips techn. T. **10**, 1-13, 1948 (No. 1).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vulling juist zo gekozen zijn dat zij de binnenkomende ultraviolette stralingsquanta niet absorbeert, aangezien zulk een absorptie niet in alle gevallen een ontladingsstoot zou teweegbrengen; en de kathode moet hier van een metaal met sterk uitwendig foto-electrisch effect worden gemaakt. In ons geval werd een kathode van zeer zuiver koper (O.F.H.C.) gekozen, die door langdurige verhitting in waterstof van de laatste verontreinigingen was bevrijd. Voor het vrijmaken van een electron uit koper is een energie $E = 4{,}42$ electronvolt vereist; de maximale golflengte waarmee een electron kan worden vrijgemaakt, is volgens de wet van Einstein $\lambda = ch/E$ (c = lichtsnelheid, h = constante van Planck), d.i. in ons geval ongeveer 2800 Å. Hieruit blijkt dat de telbuis gevoelig is in het spectrale gebied waar het ons om te doen is. De anode is een 75 μ dikke wolfraamdraad. De electroden zijn in een ballon van helder kwartsglas geplaatst en de buis is gevuld met argon onder een druk van 20 cm Hg. Een geringe hoeveelheid alcoholdamp is toegevoegd voor snelle doving van elke ontlading (vgl. [5]). Alcohol noch argon absorberen de spectraallijn 2203 Å in merkbare mate. De telbuizen bleken gedurende hun nominale levensduur zeer betrouwbaar te functionneren, zodat het toestel thans sinds meer dan drie jaren vrijwel onafgebroken in bedrijf kon worden gehouden.

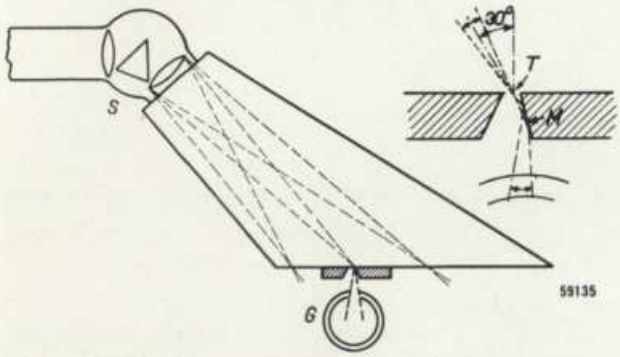


Fig. 5. Meetkundige configuratie van de bundel van stralen met golflengte 2203 Å die op de uitgangsspleet van de spectrograaf valt. Door een spiegel M van roestvrij staal, die aan de achterzijde van de spleet T is bevestigd, wordt de gehele bundel naar de opening in de kathode van de telbuis G gereflecteerd.

In de spectrograaf (een Hilger E3) convergeren de stralen van de diverse golflengten in bundels met 10° tot 30° openingshoek naar hun resp. plaatsen in het brandvlak; bovendien staat het brandvlak scheef op de assen van deze bundels; zie *fig.* 5. Het gevolg van een en ander is, dat de straling van de golflengte 2203 Å uit de uitgangsspleet treedt in de vorm van een bundel met een zeer ongunstige configuratie, dwz. die zich slecht er toe leent in een telbuis te worden opgevangen. Deze moeilijkheid kon, zonder tot een min of meer gekunstelde buisconstructie over te gaan, eenvoudig worden opgelost door achter de spleet een spiegel aan te brengen, op de wijze als in fig. 5 is te zien. Mits de spiegel onder een bepaalde hoek wordt geplaatst, reflecteert hij alle de spleet passerende straling door de opening in de kathode van de telbuis. Het reflectievermogen van staal (en de meeste andere stoffen) voor de ultraviolette straling van 2203 Å is weliswaar bij loodrechte inval tamelijk gering, doch bij nagenoeg scherende inval, zoals we die in ons geval hebben, wordt de straling vrijwel volledig gereflecteerd.

Eens in de paar maanden moet men de plaatsing van de spleet controleren en eventueel corrigeren. Dit is gemakkelijk uit te voeren door het spectrum aan weerskanten van de loodlijn 2203 Å af te tasten en tussen de naburige koperlijnen, die men zonder moeite vindt en identificeert, te interpoleren. Beweegt men de spleet over het spectrum, dan verandert tot op zekere hoogte de configuratie van de bundel welke de spiegel reflecteert. De opening in de wand van de telbuiskathode is zo groot gemaakt dat in alle posities van de spleet in het eventueel af te tasten spectrale gebied de gehele gereflecteerde bundel wordt opgevangen.

Natuurlijk moet de onderlinge justering van de spectrograaf en de vonk veel vaker worden gecontroleerd, bijv. een of twee keer op een werkdag, aangezien men niet verwachten kan dat met zulk een eenvoudig transportabel toestel onder de omstandigheden in een fabriek de justering langer goed blijft. Op gezette tijdstippen wordt de stabiliteit en gevoeligheid van het apparaat in zijn geheel getoetst, door de relatieve intensiteiten van de koperlijnen bij 2200 en 2195,8 Å te meten.

Fig. 6a geeft een beeld van het spectrum van de vonk, dat verkregen werd door de spleet in een groot aantal posities met telkens ½ Å golflengteverschil te zetten en het aantal stoten in een bepaalde tijd te tellen. Een registrogram, verkregen door een met dezelfde spectrograaf fotografisch opgenomen spectrum door te meten met een microfotometer, is in fig. 6*b* weergegeven. Het oplossend vermogen blijkt in beide gevallen nagenoeg hetzelfde te zijn en ruimschoots voldoende om de loodlijn 2203 Å van naburige koperlijnen te onderscheiden. Een opvallend verschil tussen de beide spectra is de veel zwakkere achtergrond in het telbuis-spectrum. Deze is daaraan toe te schrijven dat de teller, wegens de drempel van het foto-electrische effect, zich niets aantrekt van verstrooide straling met golflengten groter dan 2800 Å, die op de spleet valt,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

terwijl de fotografische plaat zulke stralingsbijdragen meeregistreert.

De geringe achtergrondgevoeligheid van de Geigerteller is zowel om een practische als om een principiële reden van belang.

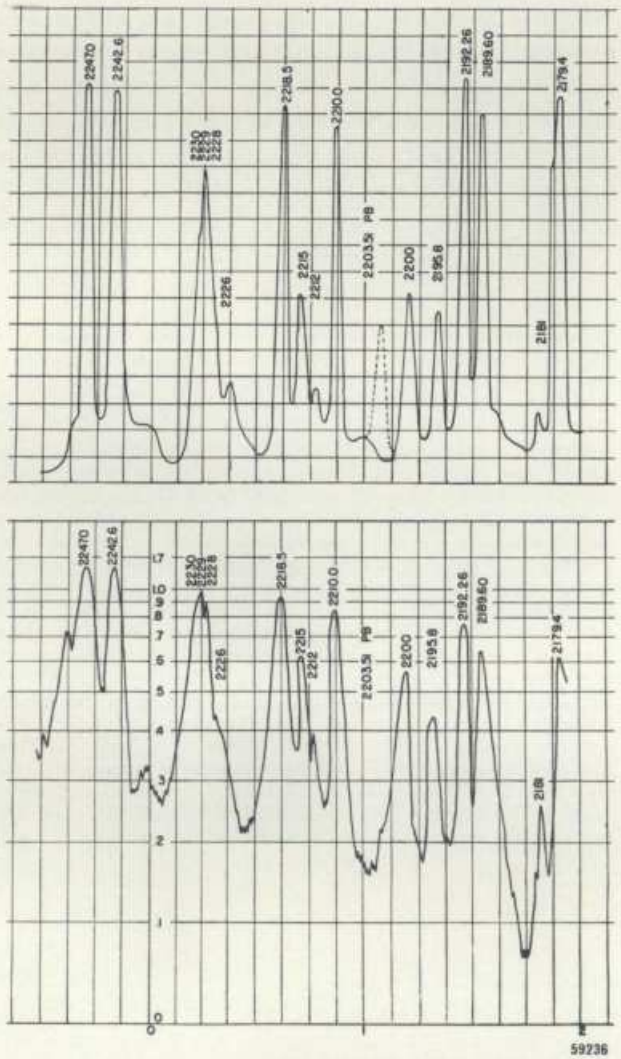


Fig. 6. *a*) Spectrum van de kopervonk, verkregen door in een groot aantal standen van de uitgangsspleet (met telkens ½ Å golflengteverschil) het aantal stoten in een bepaalde tijd te tellen. De plaats van de loodlijn 2203 Å is gestippeld aangegeven.
b) Registrogram, verkregen met de microfotometer, van een fotografisch opgenomen spectrum van de kopervonk.

Bij de fotografische methode, die het gehele spectrum geeft, kan de bijdrage van de achtergrond tot de zwarting van de plaat door bekijken van de plaat worden onderkend en er kunnen de nodige correcties voor worden aangebracht. De achtergrond laat derhalve ook heel zwakke lijnen nog wel uitkomen, en als men er voor gecorrigeerd heeft, is ook een behoorlijke kwantitatieve bepaling van de loodconcentratie uit de relatieve intensiteit der lijnen mogelijk.

Het direct aanwijzende instrument met de Geigertelbuis daarentegen laat in het normale bedrijf niet blijken of het gemeten aantal stoten per seconde te danken is aan de loodlijn dan wel aan de achtergrond. De aanwezigheid van de loodlijn kan slechts worden vastgesteld en de intensiteit (L) er van bepaald door van het totale aantal stoten ($B + L$) een constant aantal (B) af te trekken, dat volgens een vooraf uitgevoerde blanco-proef aan de achtergrond moet worden toegeschreven. Wegens de statistische verdeling der aankomsttijden van de stralingsquanta bij de telbuis, is het gemeten totale aantal stoten behept met een waarschijnlijke fout $\sqrt{B + L}$, die ten volle op de uitkomst (L) van de aftrekking komt te drukken. De relatieve fout $\sqrt{B + L}/L$ kan slechts door langer tellen worden verkleind. Klaarblijkelijk zal men voor een voorgeschreven nauwkeurigheid met een kortere telperiode kunnen volstaan naarmate de achtergrondintensiteit (B) kleiner is. Dit zal vooral van belang zijn waar men kleine aantallen stoten per seconde moet tellen (kleine intensiteit L).

Dit is een practische overweging. Een principiële is dat de waarde B, die als een statistisch gemiddelde bepaald is, in werkelijkheid niet constant blijft. Ten gevolge van het wisselende gedrag van de vonk is de achtergrond aan voortdurende variaties onderhevig. Deze variaties hebben in het geval van de Geigerteller veel meer invloed dan bij de fotografische plaat, wegens de veel kortere tijd waarover bij de meting met de telbuis wordt gemiddeld. De onzekerheid nu van de af te trekken waarde B stelt een onderste grens aan de aantoonbare loodconcentratie. Zo kunnen we zeggen dat in hoofdzaak aan de geringe gevoeligheid van de telbuis voor de achtergrond van het spectrum, de nog betrekkelijk grote gevoeligheid van het toestel voor lood te danken is. De kleinste, in een op zichzelf staande meting aantoonbare hoeveelheid lood bedraagt ongeveer 0,6 mg per m³ lucht, d.i. 1 op 2 millioen gewichtsdelen. Hoewel deze gevoeligheid niet met die van de fotografische plaat kan concurreren, is zij toch volkomen voldoende voor de taak van het lekken-zoeken, waarbij het ontdekken van plaatselijke veranderingen in het loodgehalte op de voorgrond staat.

Een ervaring van verscheidene jaren heeft de doeltreffendheid van de beschreven methode voor het aantonen van lood bewezen. Er dient echter de aandacht op te worden gevestigd dat er in de constructie van het toestel nauwelijks iets is dat specifiek voor het lood-probleem kan worden genoemd. De zuigslang en andere delen van het luchtkanaal zijn vervaardigd van „Saran" (een mate-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

riaal uit de familie der plastica), aangezien het meer voor de hand liggende rubber een hoge affiniteit tot bepaalde loodverbindingen heeft. De hoek van de spiegel achter de uitgangsspleet is speciaal gekozen voor de positie van de spleet bij 2203 Å. Afgezien van zulke kleine details is er niets om te beletten, dit of een soortgelijk instrument ook voor het aantonen van andere elementen te gebruiken. Er moet alleen voldaan zijn aan de voorwaarde dat die elementen een gevoelige emissielijn in een geschikt spectraal gebied bezitten, en dat de uitgangsspleet in de overeenkomstige positie wordt gebracht. Zo zou bijv. het onderzoek van stof op het gehalte aan arsenicum, barium of beryllium vermoedelijk op deze wijze kunnen worden uitgevoerd.

Bij gebruik van een meer constante lichtbron en met een wat omslachtiger werkwijze kan een spectrochemische analyse met de Geigerteller ook worden toegepast in gevallen waar nauwkeurige kwantitatieve uitkomsten worden gevraagd. Dit is niet lang geleden aangetoond door enige publicaties over de bepaling van het gehalte aan phosphorus van staal[6]). In zulke gevallen omzeilt men de boven vermelde achtergrondmoeilijkheden door middel van een methode met een „inwendige standaard", analoog aan die bij de fotografische werkwijze: men gebruikt twee Geigertelbuizen, waarmee men de verhouding tussen de intensiteit van de loodlijn en een naburige koperlijn kan bepalen en aldus de fluctuerende achtergrond kan elimineren. Hoewel ook in ons geval soms nauwkeurige kwantitatieve uitkomsten gewenst kunnen zijn, is voor het beschreven toestel toch er van afgezien de methode van de inwendige standaard toe te passen, daar dit voor het hoofddoel, het opsporen van lekken, een onnodige complicatie van het instrument zou hebben medegebracht. De kwantitatieve inlichting die men een enkele keer zal wensen, kan men zich voor dat geval gemakkelijk genoeg met een fotografische opname van het spectrum verschaffen.

[6]) R. Hanau en R. A. Wolfe, J. Opt. Soc. Amer. **38**, 377-383, 1948 (No. 4); F. R. Bryan en G. A. Nahstoll, J. Opt. Soc. Amer. **38**, 510-517, 1948 (No. 6).

Samenvatting. In een fabrieksgebouw waarin de atmosfeer door eventuele lekken in de installaties bezwangerd kan raken met lood of loodverbindingen, plaatst men twee koperen electroden waartussen een vonkontlading wordt onderhouden. Bevat de lucht rondom de electroden lood, dan zal in het spectrum van de vonk de loodlijn bij 2203 Å optreden. Door middel van een kleine kwartsspectrograaf, in welks brandvlak een verschuifbare spleet is aangebracht, isoleert men de genoemde spectraallijn, en men meet de intensiteit ervan met behulp van een foto-electrische Geigertelbuis in een geschikte schakeling. Het apparaat kan in het normale bedrijf 0,60 mg lood per m³ lucht aantonen; de beperking van de gevoeligheid tot deze waarde is te wijten aan de fluctuaties van de continue achtergrond in het vonkspectrum. Hoewel de genoemde loodconcentratie de maximaal toelaatbare waarde (0,15 mg per m³ lucht) overschrijdt, is het toestel toch zeer nuttig gebleken voor het ontdekken en localiseren van kleine lekken in pijpen en kranen, in welker nabijheid hoge loodconcentraties kunnen optreden. De superioriteit van de methode boven de gebruikelijke (en gevoeliger) fotografische werkwijze is te danken aan het feit dat de direct aanwijzende, continu werkende stralingsmeter ideaal geschikt is voor het constateren van veranderingen in de concentratie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!